



**SKRIPSI – TK141581**

**PENGOLAHAN LIMBAH PLASTIK *HIGH DENSITY POLYETHYLENE* DENGAN METODE PIROLISIS *MICROWAVE* DAN MENGGUNAKAN KATALIS KARBON AKTIF DARI TEMPURUNG KELAPA UNTUK MENGHASILKAN BAHAN BAKAR ALTERNATIF**

**Muhammad Abdillah  
NRP. 2313100102**

**Mohamad Iqbal Hisbullah  
NRP. 2313100104**

**Dosen Pembimbing :  
Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M.Eng.  
NIP. 19590730 198603 2 001**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2017**



**SKRIPSI – TK141581**

**PENGOLAHAN LIMBAH PLASTIK *HIGH DENSITY POLYETHYLENE* DENGAN METODE PIROLISIS *MICROWAVE* DAN MENGGUNAKAN KATALIS KARBON AKTIF DARI TEMPURUNG KELAPA UNTUK MENGHASILKAN BAHAN BAKAR ALTERNATIF**

**Muhammad Abdillah  
NRP. 2313100102**

**Mohamad Iqbal Hisbullah  
NRP. 2313100104**

**Dosen Pembimbing :  
Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M.Eng.  
NIP. 19590730 198603 2 001**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2017**



**FINAL PROJECT– TK141581**

**HIGH DENSITY POLYETHYLENE PLASTIC WASTE  
TREATMENT WITH MICROWAVE HEATING  
PYROLYSIS METHOD USING COCONUT-SHELL  
ACTIVATED CARBON AS CATALYST TO PRODUCE  
ALTERNATIVE FUELS**

**Muhammad Abdillah  
NRP. 2313100102**

**Mohamad Iqbal Hisbullah  
NRP. 2313100104**

**Advisor :  
Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M.Eng.  
NIP. 19590730 198603 2 001**

**CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA 2017**

## LEMBAR PENGESAHAN

**Pengolahan Limbah Plastik *High Density Polyethylene* dengan  
Metode Pirolisis *Microwave* dan Menggunakan Katalis  
Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa untuk Menghasilkan  
Bahan Bakar Alternatif**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kimia  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Oleh :

**Muhammad Abdillah**

**NRP. 2313100102**

**Mohamad Iqbal Hisbullah**

**NRP. 2313100104**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, ..... (Pembimbing 1)  
M. Eng.
2. Ir. Nuniek Hendrianie, M.T. .... (Penguji I)
3. Dr. Lailatul Qadariyah, S.T., M.T. .... (Penguji II)





# **PENGOLAHAN LIMBAH PLASTIK *HIGH DENSITY POLYETHYLENE* DENGAN METODE PIROLISIS *MICROWAVE* DAN MENGGUNAKAN KATALIS KARBON AKTIF DARI TEMPURUNG KELAPA UNTUK MENGHASILKAN BAHAN BAKAR ALTERNATIF**

## **ABSTRAK**

Dari data Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia pada tahun 2012 tercatat bahwa produksi plastik di Indonesia berkisar pada angka 5,4 juta ton/tahun. Salah satu jenis sampah plastik adalah HDPE (*High Density Polyethylene*). Plastik HDPE memiliki sifat yang cenderung lebih keras dan tahan terhadap suhu yang cukup tinggi. Penelitian terkait pengolahan sampah plastik ini terus berkembang salah satunya adalah pirolisis. Namun pada perkembangannya, pirolisis cenderung membutuhkan waktu yang banyak dan energi yang digunakan masih kurang efisien dan katalis yang cenderung mahal. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui apakah limbah plastik HDPE mampu diubah menjadi bahan bakar alternatif dengan pirolisis dan katalis karbon aktif dari tempurung kelapa menggunakan metode *microwave heating* serta mengetahui pengaruh suhu, waktu, dan rasio katalis terhadap plastik HDPE. Proses pirolisis dilakukan menggunakan reaktor tertutup berkapasitas 500 mL dan beroperasi pada tekanan 1 atm. Sampel limbah plastik HDPE yang digunakan sebanyak 125 gram dan menggunakan katalis karbon aktif dari tempurung kelapa dengan variabel rasio HDPE : jumlah katalis 1:0,4 ; 1:0,6 ; 1:1. Sampel dipanaskan sampai suhu 250, 300, 350, dan 400°C dan dipertahankan pada variabel waktu selama 15, 30, dan 45 menit. Produk cair dianalisis dengan *Gas Chromatography – Mass Spectrometry* (GC-MS), produk gas dianalisis dengan *Gas*

*Chromatography* (GC), serta massa produk cair dan massa residu di timbang untuk mendapatkan data *yield* dari hasil proses pirolisis.

Dari hasil penelitian, diperoleh hasil terbaik dari proses pirolisis dengan *microwave* pada waktu operasi 45 menit, suhu operasi 400 °C, dan rasio HDPE : jumlah katalis = 1:1 dengan yield produk cair dan produk gas sebesar 99,22%; yield residu sebesar 0,78%; kadar komposisi produk cair (cycloparaffin dan n-paraffin) sebesar 54,09%; dan konsentrasi gas metana yang dihasilkan sebesar 10,2%.

Kata kunci : *Coconut Shell Activated Carbon, HDPE, Microwave Heating*

# **HIGH DENSITY POLYETHYLENE PLASTIC WASTE TREATMENT WITH MICROWAVE HEATING PYROLYSIS METHOD USING COCONUT-SHELL ACTIVATED CARBON TO PRODUCE ALTERNATIVE FUELS**

## **ABSTRACT**

From data of Living Environment Ministry of Indonesia at 2012 recorded that production of plastic at Indonesia about 5,4 million tons/year. One of the most widely plastic waste is HDPE (High Density Polyethylene), because HDPE properties are harder and resistant to a high temperature. Pyrolysis is one of the plastic waste treatment method. However, the development of pyrolysis tend to require a lot of time and energy with lacking efficiency and the catalysts that used tend to be expensive. The purposes of this research are to know that HDPE plastic waste can be change into alternative fuels with microwave heating pyrolysis method using coconut-shell activated carbon as catalyst and to know the effect of temperatures, times, and ratio between catalyst and HDPE plastic. Pyrolysis process was done using closed reactor with capacity 500 mL and the reactor pressure is 1 atm. Waste plastic sample are used as much as 125 grams of HDPE plastic and using coconut shell-activated carbon as a catalyst with variable ratio between HDPE plastic to number of catalyst were 1:0,4 ; 1:0,6 ; 1:1. The sample was heated to temperatures about 250, 300, 350, and 400 °C and maintained at variable times for 15, 30, and 45 minutes. Liquid product were analyzed by Gas Chromatography – Mass Spectrometry (GC-MS), gas product were analyzed by Gas Chromatography (GC), and liquid and residue masses were measured to have the product's yield of pyrolysis process.

From the experimental research result, obtained best variable of pyrolysis process with microwave method is at 45

minute, at temperature 400°C, and ratio between HDPE plastic to number of catalyst is 1:1 with yield of liquid and gas product is 99,22%; yield of residue is 0,78%; value of liquid product's composition (cycloparaffin and n-paraffin) is 54,09%; and concentration of methane gas is 10,2%.

Keywords : Coconut-Shell Activated Carbon, HDPE, Microwave Heating

## KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah kehadiran Allah SWT Yang Maha Mengetahui terhadap setiap yang ada di bumi dan di langit, hanya karena rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi ini berjudul “Pengolahan Limbah Plastik *High Density Polyethylene* dengan Metode Pirolisis *Microwave* dan Menggunakan Katalis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa untuk Menghasilkan Bahan Bakar Alternatif”

Penulisan skripsi ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Oleh sebab itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Juwari, S.T., M.Eng., Ph.D., selaku ketua departemen Teknik Kimia FTI-ITS
2. Ibu Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M.Eng., selaku dosen pembimbing dan kepala Laboratorium Pengolahan Limbah Industri departemen Teknik Kimia FTI-ITS yang telah banyak memberikan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
3. Kedua orang tua dan seluruh keluarga besar yang selalu mendoakan, memberikan dukungan, dan semangat kepada penulis mulai awal perkuliahan hingga mengerjakan proposal skripsi ini.
4. Seluruh anggota Laboratorium Pengolahan Limbah Industri departemen Teknik Kimia FTI-ITS 2016/2017 yang telah membantu dan memberikan semangat selama penulis mengerjakan skripsi ini.
5. Rekan-rekan Teknik Kimia terutama angkatan 2013 (K-53) dan semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu yang telah banyak membantu hingga terselesainya skripsi ini.

Skripsi ini tentunya masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran demi

penyempurnaan skripsi ini. Akhirnya, penulis berharap agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

# DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>ABSTRAK</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	viii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	x
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xvi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xx
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
I.1 Latar Belakang.....	I-1
I.2 Rumusan Masalah.....	I-2
I.3 Tujuan Penelitian.....	I-3
I.4 Rumusan Masalah.....	I-3
I.5 Batasan Masalah.....	I-3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
II.1 Bahan Baku.....	II-1
II.1.1 Polimer.....	II-1
II.1.2 <i>Polyethylene</i> .....	II-5
II.1.3 HDPE ( <i>High Density Polyethylene</i> ).....	II-9
II.2 Pirolisis.....	II-10
II.2.1 Pengertian.....	II-10
II.2.2 Mekanisme Degradasi pada Pirolisis.....	II-11
II.2.3 <i>Microwave Heating Method</i> .....	II-13
II.2.3.1 Perbandingan <i>Microwave Heating</i> dengan <i>Conventional Method</i> .....	II-13



	II.2.3.2	Proses Pemanasan dengan <i>Microwave</i>	II-14
	II.2.3.3	Prinsip Operasi <i>Microwave Oven</i>	II-16
II.3	Katalis.....		II-17
	II.3.1	Pengertian Katalis Secara Umum.....	II-17
	II.3.2	Katalis Homogen dan Heterogen.....	II-17
	II.3.3	Katalis yang Digunakan pada Pirolisis.....	II-19
	II.3.4	Karakteristik Tempurung Kelapa.....	II-20
	II.3.5	Katalis Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa.....	II-22
	II.3.6	Karakteristik Katalis <i>Coconut-Shell Activated Carbon (CSAC)</i> .....	II-23
II.4	Penelitian Terdahulu.....		II-25
<b>BAB III</b>	<b>METODOLOGI PENELITIAN</b>		
III.1	Tempat dan Waktu Penelitian.....		III-1
III.2	Bahan dan Alat Penelitian.....		III-1
	III.2.1	Bahan Penelitian.....	III-1
	III.2.2	Alat Penelitian.....	III-1
III.3	Kondisi Operasi dan Variabel Penelitian.....		III-1
	III.3.1	Kondisi Operasi.....	III-1
	III.3.2	Variabel Penelitian.....	III-2
III.4	Tahapan Metodologi Penelitian..		III-2
	III.4.1	Rangkaian Alat.....	III-2

III.4.2	Aktivasi Kembali Katalis Karbon dari Tempurung Kelapa.....	III-4
III.4.3	Pirolisis.....	III-5
III.5	Teknik Analisis.....	III-6
III.5.1	Analisis Kandungan Bahan Baku (Plastik HDPE) Menggunakan FTIR ( <i>Fourier Transform Infra Red</i> ) dengan Merk “Thermo Scientific iS10”.....	III-6
III.5.2	Analisis Kandungan dan Morfologi Katalis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa dan Hasil Produk Padat (Residu) Menggunakan SEM-EDX ( <i>Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray spectroscopy</i> ) dengan Merk “Fei Inspect S50”	III-6
III.5.3	Analisis untuk Mengetahui Aktivasi Katalis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa Menggunakan BET ( <i>Brunauer, Emmet, dan Teller</i> ) dengan Merk “Quanthrome Novawin”	III-6

	III.5.4	Analisis Kandungan Gas Menggunakan GC ( <i>Gas Chromatography</i> ) dengan Merk “Aglient Hewliet Packard 6890 Series”.....	III-6
	III.5.5	Analisis Kandungan Produk Cair Menggunakan GC-MS ( <i>Gas Chromatography – Mass Spectrometry</i> ) dengan Merk “HP 6890 GC Method : Liquid 16 M.....	III-7
	III.6	Pengolahan Data.....	III-7
<b>BAB IV</b>		<b>HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
	IV.1	Analisis Bahan Baku dan Katalis	IV-1
	IV.1.1	Analisis Bahan Baku..	IV-1
	IV.1.2	Analisis Katalis.....	IV-3
	IV.2	Produk yang diharapkan dan Residu.....	IV-7
	IV.3	Pengaruh Waktu terhadap Hasil Pirolisis Microwave.....	IV-10
	IV.3.1	Pengaruh Waktu terhadap Yield.....	IV-11
	IV.3.2	Pengaruh Waktu terhadap Komposisi... ..	IV-14
	IV.4	Pengaruh Suhu terhadap Hasil Pirolisis Microwave.....	IV-17
	IV.4.1	Pengaruh Suhu terhadap Yield.....	IV-17
	IV.4.2	Pengaruh Suhu terhadap Komposisi.....	IV-20
	IV.5	Pengaruh Jumlah Katalis terhadap Hasil Pirolisis Microwave.....	IV-24

IV.5.1	Pengaruh Jumlah Katalis terhadap Yield	IV-25
IV.5.2	Pengaruh Jumlah Katalis terhadap Komposisi.....	IV-27
<b>BAB V</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
V.1	Kesimpulan.....	V-1
V.2	Saran.....	V-1
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>		xxii
<b>APPENDIKS</b>		A-1
<b>BIODATA PENULIS</b>		

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1	<i>Polypropylene</i> .....	II-3
Gambar II.2	<i>Polystyrene</i> .....	II-3
Gambar II.3	<i>Polyethylene terephthalate</i> .....	II-4
Gambar II.4	<i>Polyvinylchloride</i> .....	II-5
Gambar II.5	<i>Polyamide</i> .....	II-5
Gambar II.6	<i>Polyethylene</i> .....	II-6
Gambar II.7	Skema HDPE ( <i>High Density Polyethylene</i> ).....	II-7
Gambar II.8	Skema LDPE ( <i>Low Density Polyethylene</i> ) .....	II-7
Gambar II.9	Skema LLDPE ( <i>Linear Low Density Polyethylene</i> ) .....	II-8
Gambar II.10	Skema VLDPE ( <i>Very Low Density Polyethylene</i> ) .....	II-8
Gambar II.11	Skema HDPE Linear dan Bercabang ...	II-9
Gambar II.12	Mekanisme Degradasi saat Pirolisis ...	II-12
Gambar II.13	Mekanisme Degradasi saat Pirolisis ...	II-12
Gambar II.14	Pirogram dari <i>Polyethylene</i> .....	II-13
Gambar II.15	Profil <i>Microwave</i> .....	II-15
Gambar II.16	Hasil Analisis XRD dari <i>Coconut-Shell Ash</i> .....	II-20
Gambar II.17	Hasil Analisis SEM/EDS dari <i>Coconut-Shell Ash</i> .....	II-21
Gambar II.18	Hasil Yield Proses Pirolisis Gliserol ...	II-22
Gambar II.19	Hasil Morfologi SEM dari <i>Coconut-Shell</i> .....	II-24
Gambar III.1	Rangkaian Alat Penelitian .....	III-3
Gambar III.2	Langkah Pengaktifan Kembali Katalis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa	III-4
Gambar III.3	Proses Pirolisis HDPE dengan Metode Microwave Heating .....	III-5
Gambar IV.1	Sampel Plastik HDPE .....	IV-1

Gambar IV.2	Hasil Analisis Sampel Plastik HDPE Menggunakan FTIR .....	IV-2
Gambar IV.3	Katalis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa (CSAC) yang digunakan pada Penelitian ini .....	IV-4
Gambar IV.4	Hasil Analisis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa (CSAC) Menggunakan SEM/EDX pada Perbesaran 20 $\mu$ m .....	IV-5
Gambar IV.5	Kurva Hasil Analisis Katalis Karon Aktif dari Tempurung Kelapa (CSAC) Menggunakan BET .....	IV-6
Gambar IV.6	Produk Cair Hasil Percobaan Pirolisis <i>Microwave</i> .....	IV-7
Gambar IV.7	Produk Padat (Residu) Hasil Percobaan Pirolisis <i>Microwave</i> .....	IV-9
Gambar IV.8	Hasil Analisis Produk Padat (Residu) Menggunakan EDX .....	IV-10
Gambar IV.9	Pengaruh Waktu terhadap Yield Residu, Produk Cair, dan Produk Gas pada Suhu 300°C dan Katalis 75 gram .....	IV-12
Gambar IV.10	Pengaruh Waktu terhadap Yield Residu dan Produk yang diharapkan (Produk Cair dan Produk Gas) pada Suhu 300°C dan Katalis 75 gram .....	IV-13
Gambar IV.11	Pengaruh Waktu terhadap Komposisi Produk Cair pada Suhu 300°C dan Katalis 75 gram .....	IV-15
Gambar IV.12	Pengaruh Waktu terhadap Komposisi Produk Gas pada Suhu 300°C dan Katalis 75 gram .....	IV-12
Gambar IV.13	Pengaruh Suhu pada Waktu 45 menit dan Katalis 75 gram .....	IV-18
Gambar IV.14	Pengaruh Suhu Yield Produk yang diharapkan (Produk Cair dan Produk	IV-20



	Gas) pada Waktu 45 menit dan Katalis 75 gram .....	
Gambar IV.15	Pengaruh Suhu terhadap Komposisi Produk Cair pada Waktu 45 menit dan Katalis 75 gram .....	IV-23
Gambar IV.16	Pengaruh Waktu terhadap Komposisi Produk Gas pada Waktu 45 menit dan Katalis 75 gram .....	IV-16
Gambar IV.17	Pengaruh Jumlah Katalis terhadap Yield Residu dan Produk yang diharapkan (Produk Cair dan Produk Gas) pada Suhu 400°C dan Waktu 45 menit .....	IV-26
Gambar IV.18	Pengaruh Jumlah Katalis terhadap Yield Residu dan Yield Produk yang diharapkan (Produk Cair dan Produk Gas) pada Suhu 400°C dan Waktu 45 menit .....	IV-18
Gambar IV.19	Pengaruh Jumlah Katalis pada Suhu 400°C dan Waktu 45 menit .....	IV-29

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

Tabel II.1	Perbedaan yang Terjadi antara Metode <i>Microwave Heating</i> dan <i>Conventional Heating</i> .....	II-14
Tabel II.2	Yield pada <i>Thermal</i> dan <i>Catalytic Pyrolysis</i> dari HDPE menggunakan ZSM-5 .....	II-18
Tabel II.3	Data Hasil Analisis dari <i>Coconut-Shell Ash</i> .....	II-20
Tabel II.4	Hasil Analisis XRF dari <i>Coconut-Shell Ash</i> .....	II-21
Tabel II.5	Analisis <i>Proximate</i> dan <i>Ultimate</i> dari Tempurung Kelapa/ <i>Coconut-Shell</i> (CS), <i>Coconut-Shell Carbon</i> (CSC), <i>Coconut-Shell Activated Carbon</i> (CSAC).....	II-23
Tabel II.6	Luas Permukaan dan Ukuran Pori <i>Coconut-Shell Carbon</i> (CSC) dan <i>Coconut-Shell Activated Carbon</i> (CSAC) dengan Waktu Radiasi <i>Microwave</i> yang Berbeda .....	II-24

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **I.1 Latar Belakang**

Sampah plastik merupakan salah satu permasalahan yang cukup pelik sejak dahulu hingga saat ini. Sedangkan, produksi plastik terus meningkat begitu pula dengan konsumsi dan limbah yang dihasilkan. Dari data Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia pada tahun 2012 tercatat bahwa produksi plastik di Indonesia sendiri berkisar pada angka 5,4 juta ton/tahun. Meningkatnya produksi ini tidak diiringi dengan pengembangan teknologi pengolah sampah plastik. Sehingga, semakin lama maka semakin menumpuk jumlah sampah plastik. Salah satu sampah plastik yang cukup dominan adalah plastik berbahan dasar HDPE (*High Density Polyethylene*) dikarenakan plastik berbahan dasar ini memiliki sifat yang cenderung lebih keras dan tahan terhadap suhu yang cukup tinggi atau berkisar pada 120°C. Sehingga, banyak sekali digunakan sebagai bahan plastik yang umum. Plastik HDPE ini sering dijumpai dalam bentuk kantong plastik, kontainer makanan, *fitting pipa*, botol susu bayi, dan lain-lain.

Pengolahan sampah plastik selama ini hanya terbatas pada proses pembakaran serta didaur ulang. Sebelumnya, telah dilakukan penelitian terkait metode daur ulang dari sampah plastik ini. Salah satu metode yang dilakukan adalah Pirolisis.

Proses Pirolisis akan mengubah sampah plastik menjadi bahan bakar alternatif. Dengan metode ini selain mengatasi masalah penumpukan sampah plastik juga dapat menjadi terobosan baru dalam dunia energi terbarukan. Proses Pirolisis yang sudah umum dilakukan terdapat dua metode yakni *conventional heating* dan *microwave heating*. Masing-masing proses memiliki kekurangan dan kelebihan. Kelebihan dari proses *microwave heating* adalah waktu reaksi yang lebih singkat, lebih

mudah memanaskan bahan polimer, dan efisiensi pemanasan yang tinggi namun *microwave heating* membutuhkan tenaga listrik. Di sisi lain proses *conventional heating* membutuhkan waktu reaksi yang lebih lama dan membutuhkan bahan bakar dalam prosesnya. Sehingga dalam proses pirolisis HDPE lebih baik menggunakan *microwave heating*.

Dalam proses pirolisis diperlukan katalis untuk mendukung *thermal cracking* dari hidrokarbon. Sebelumnya sudah banyak dilakukan penelitian dengan berbagai jenis katalis. Namun, kebanyakan pada penelitian tersebut menggunakan katalis logam yang pada dasarnya memiliki harga yang cukup mahal. Hal ini menjadi tidak sepadan ketika produk yang dihasilkan hanya berupa kerosene yang harganya murah. Sehingga dalam proses pirolisis diperlukan katalis yang bisa didapatkan dengan harga terjangkau. Salah satu bahan yang memiliki potensi sebagai katalis adalah karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa.

Maka dari itu dilakukan penelitian tentang “Pengolahan Limbah Plastik *High Density Polyethylene* dengan Metode Pirolisis *Microwave* dan Menggunakan Katalis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa untuk Menghasilkan Bahan Bakar Alternatif”.

## **I.2. Rumusan Masalah**

Dari uraian latar belakang diatas, maka bisa dirumuskan permasalahan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Limbah plastik HDPE cukup tinggi namun proses pengolahan limbah plastik HDPE masih belum banyak. Salah satunya pengolahannya dengan pirolisis. Sehingga, dengan adanya pengolahan limbah plastik HDPE dengan pirolisis menggunakan metode *microwave heating* diharapkan mampu mendegradasi komponen dan mengubah menjadi bahan bakar alternatif.
2. Penggunaan katalis alami untuk pengolahan limbah plastik HDPE dengan pirolisis menggunakan metode *microwave heating* selama ini masih kurang dan hanya menggunakan katalis logam yang memiliki harga cukup tinggi.

### **I.3 Tujuan Penelitian**

1. Mengetahui apakah limbah plastik HDPE mampu diubah menjadi bahan bakar alternatif dengan pirolisis dan katalis karbon aktif dari tempurung kelapa menggunakan metode *microwave heating*.
2. Mempelajari pengaruh waktu operasi, suhu operasi, dan rasio HDPE : jumlah katalis terhadap yield dan komposisi dari bahan bakar alternatif hasil dari proses pirolisis dengan metode *microwave heating*.

### **I.4 Manfaat Penelitian**

1. Pengolahan limbah plastik menjadi bahan bakar alternatif dari bahan baku plastik HDPE yang melimpah sehingga dapat memaksimalkan nilai guna plastik HDPE dengan menggunakan pirolisis dengan menggunakan metode *microwave heating* yang ramah lingkungan.
2. Memberikan solusi terhadap permasalahan pemenuhan kebutuhan energi terbarukan yang semakin meningkat dengan mengkonversi limbah plastik HDPE menjadi bahan bakar alternatif.

### **I.5 Batasan Masalah**

1. Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium dengan volume total 500 mL dan volume kerja 300 mL.
2. Penelitian menggunakan bahan plastik HDPE bening.
3. Penelitian menggunakan katalis alami berupa karbon aktif berbasah dasar tempurung kelapa.
4. Penelitian dilakukan untuk mengetahui hasil berupa kadar pada produk cair dan produk gas.



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **II.1 Bahan Baku**

##### **II.1.1. Polimer**

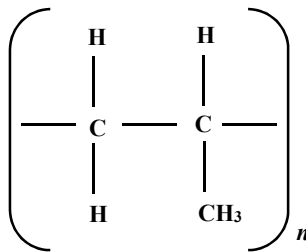
Menurut Anthony (2003), polimer biasanya digunakan dalam pembuatan produk untuk aplikasi seperti konstruksi (perabot dan bangunan), transportasi (berbasis darat dan angkasa luar kendaraan), serta konsumen dan industri barang (kemasan, peralatan listrik dan elektronik, peralatan medis, olahraga, dan artikel rekreasi, dan lain-lain). Paparan suhu dan berbagai macam paparan lingkungan dari polimer umumnya menyebabkan degradasi dan kerusakan polimer. Degradasi polimer dapat dianggap sebagai semua jenis modifikasi dari rantai polimer yang melibatkan rantai utama, rantai cabang, atau keduanya. Perubahan ini umumnya terjadi karena perubahan kimia secara alami (yang membutuhkan pemecahan ikatan valensi primer), yang mengarah ke berat molekul terendah, penyilangan, dan siklisasi. Berikut merupakan jenis degradasi polimer yang terjadi karena faktor lingkungan :

- a. Degradasi suhu, dikarenakan oleh paparan suhu tinggi
- b. Degradasi oksidatif, dikarenakan oleh paparan oksidator masuk
- c. Degradasi radiasi, dikarenakan oleh paparan energi radiasi
- d. Degradasi mekanik dan ultrasonik, dikarenakan oleh jenis mesin (misal : *grinding*, *ball milling*, *roll milling*, dan lain-lain)
- e. Degradasi kimia, dikarenakan oleh paparan bahan kimia
- f. Degradasi biologi, dikarenakan oleh paparan organisme hidup, biasanya karena mikroorganisme seperti jamur dan bakteri.

Polimer terdiri dari lima jenis, diantaranya : *polyethylene* (PE), *polypropylene* (PP), *polystyrene* (PS), *polyethylene terephthalate* (PET), *polyvinylchloride* (PVC), dan *polyamide* (PA). (Andrea, 2013)

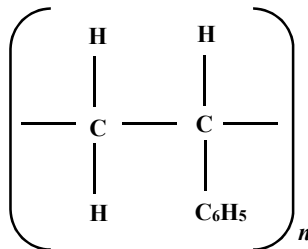
*Polyethylene* adalah bahan semi kristal dengan ketahanan kimia yang sangat baik, kelelahan yang baik dan tahan lama, serta memiliki luas yang bermacam-macam. *Polyethylene* terbagi menjadi empat hasil yaitu HDPE (*High Density Polyethylene*), LDPE (*Low Density Polyethylene*), LLDPE (*Linear Low Density Polyethylene*), VLDPE (*Very Low Density Polyethylene*). (Andrew, 2000) Contoh penggunaan *Polyethylene* dalam kehidupan sehari-hari adalah sebagai berikut : untuk HDPE biasanya digunakan untuk karung, plastik tempat sampah, kontainer kosmetik, botol susu, botol obat-obatan, dan mainan anak-anak. Untuk LDPE, biasanya digunakan untuk *diaper backing*, *shrink-wrap*, tas *dry cleaning*, dan *flexible pipe*. Untuk LLDPE, biasanya digunakan untuk karung, *stretch-wrap*, balon, dan wadah penyimpanan makanan. Untuk VLDPE biasanya digunakan untuk *medical tubing*, kemasan pembungkus daging, dan *diaper backing*. (Andrew, 2000).

*Polypropylene* adalah lapisan bening yang mengkilat dengan ketahanan tinggi dan kuat terhadap kebocoran. Selain itu, juga memiliki penghalang yang cukup terhadap kandungan air, gas, dan aroma, yang mana tidak akan berdampak terhadap perubahan kelembaban. *Polypropylene* ini biasanya digunakan untuk kaleng biskuit, bungkus *snack*, dan makanan kering. (Dogan, 2012). Rumus bangun *polypropylene* dapat dilihat pada gambar II.1 :



**Gambar II.1.** *Polypropylene*  
(Sumber : Kalpakjian, 2008)

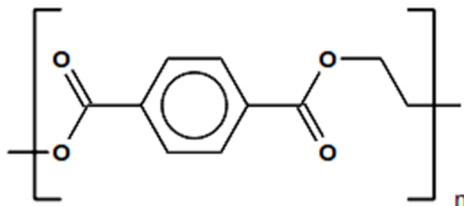
*Polystyrene* adalah plastik yang sangat berguna dan bisa digunakan untuk produk konsumen dengan variasi yang sangat luas. Sebagai contoh, plastik padat, biasanya digunakan pada produk yang membutuhkan kejernihan, seperti kemasan makanan dan barang laboratorium. Jika dikombinasikan dengan berbagai pewarna atau plastik jenis lain, maka PS dapat dijadikan sebagai alat-alat, elektronik, *sparepart* kendaraan, mainan, pot tanaman, dan lain-lain. ([www.chemicalsafetyfacts.org](http://www.chemicalsafetyfacts.org)). Rumus bangun *polystyrene* dapat dilihat pada gambar II.2 :



**Gambar II.2.** *Polystyrene*  
(Sumber : Kalpakjian, 2008)

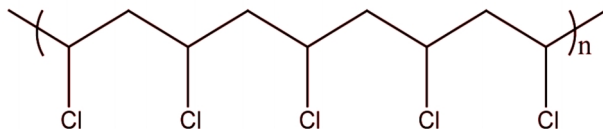
*Polyethylene terephthalate* adalah plastik yang bening, kuat, dan ringan. Biasanya digunakan untuk kemasan makanan

dan minuman, terutama kemasan minuman ringan, jus, dan air. Selain itu, PET digunakan untuk kemasan bumbu salad, kemasan selai kacang, kemasan minyak goreng, kemasan sampo, dan kemasan sabun tangan cair. PET sangat aman jika berkontak dengan makanan. ([www.petresin.org](http://www.petresin.org)). PET terbentuk dari asam *terephthalic* (sebuah asam dikarboksilat) dan *ethylene glycol* (sebuah dialkohol). Kedua substansi bereaksi secara bersamaan untuk membentuk rantai polimer panjang dengan air sebagai produk samping. (European Federation of Bottled Waters). Rumus bangun *polyethylene terephthalate* dapat dilihat pada gambar II.3 :



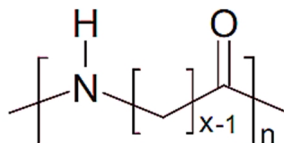
**Gambar II.3.** *Polyethylene terephthalate*  
(Sumber : European Federation of Bottled Waters)

*Polyvinylchloride* adalah salah satu bahan termoplastik sangat banyak didunia karena memiliki karakter yang sangat bernilai, banyak diaplikasikan terhadap banyak hal, tahan terhadap bahan kimia, karakter penghalang, dan harganya murah. Selain itu, kestabilan suhu dan kemudahan untuk pemrosesan dari PVC ini masih dibawah rata-rata jika dibandingkan *polyethylene*, *polypropylene*, dan *polyamide*. Karakter tersebut dapat diperkuat dengan mencampurkan PVC dengan pengisi organik atau non-organik. Biasanya pengisi yang sangat digunakan adalah *calcium carbonate*. (Ameer, 2013). Rumus bangun *polyvinylchloride* dapat dilihat pada gambar II.4 :



**Gambar II.4.** *Polyvinylchloride*  
(Sumber : Ameer, 2013)

*Polyamide* atau yang biasanya disebut nilon, adalah sebagai dasar pembuat polipetida. Biasanya, *polyamide* diaplikasikan untuk ban, karpet, kaos kaki, kain pelapis, dan bahan perekat. Semua *polyamide* biasanya mempunyai rantai amida (-CONH-) ganda yang ada pada struktur molekulnya dan bisa dibagi menjadi dua kategori utama yaitu poliamida alifatik dan poliamida aromatik. (Vinken, 2008). Rumus bangun *polyamide* dapat dilihat pada gambar II.5 :



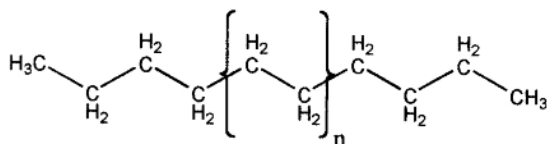
**Gambar II.5.** *Polyamide*  
(Sumber : Vinken, 2008)

### II.1.2. Polyethylene

Plastik yang dihasilkan oleh proses polimerisasi etilene ( $\text{H}_2\text{C} = \text{CH}_2$ ) adalah *Polyethylene*. (Werner, 2007).

Menurut WS Hampshire, Inc., *Polyethylene* adalah bahan semi kristal dengan ketahanan kimia yang sangat baik, kelelahan yang baik dan tahan lama, serta memiliki luas yang bermacam-macam. *Polyethylene* sangat mudah dibedakan dengan jenis plastik yang lain karena dapat mengapung diatas air. *Polyethylene*

sangat tahan terhadap bahan pelarut organik, agen penghapus, dan serangan elektrolit. *Polyethylene* memiliki dampak ketahanan yang tinggi, tetapi suhu kerjanya sangat rendah dan daya renggangnya lebih rendah daripada *polypropylene*. *Polyethylene* sangat ringan, tahan terhadap pewarnaan, dan memiliki tingkat penyerapan kadar air yang rendah. Rumus bangun *polyethylene* dapat dilihat pada gambar II.6 :

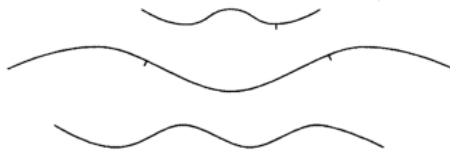


**Gambar II.6.** *Polyethylene*  
(Sumber : Andrew, 2000)

*Polyethylene* terbagi menjadi empat hasil yaitu HDPE (*High Density Polyethylene*), LDPE (*Low Density Polyethylene*), LLDPE (*Linear Low Density Polyethylene*), dan VLDPE (*Very Low Density Polyethylene*). (Andrew, 2000).

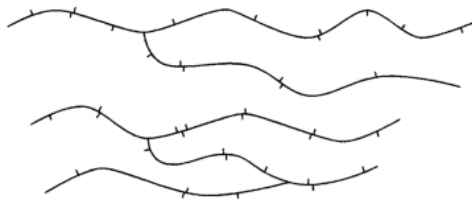
HDPE (*High Density Polyethylene*) adalah sebuah bahan termoplastik yang terbentuk dari atom karbon dan hidrogen yang bersatu dan membentuk berat molekul produk yang tinggi. Kemudian, dengan aplikasi panas dan tekanan, maka terbentuk *polyethylene*. Rantai polimer yang terbentuk sekitar 500.000 hingga 1.000.000 panjang unit karbon. Panjang atau pendek rantai samping berada pada rantai utama molekul. Semakin panjang rantai utamanya, maka nomor atom dan berat molekulnya adalah yang terbaik. (Lester H. Gabriel). Karena, potensi memiliki rantai cabangnya sangat rendah, maka biasanya HDPE disebut LPE (*Linear Polyethylene*). Plastik HDPE umumnya digunakan untuk karung, plastik tempat sampah, kontainer kosmetik, botol susu, botol obat-obatan, dan mainan anak-anak (Andrew, 2000). Skema HDPE dapat dilihat pada gambar II.7 :





**Gambar II.7.** Skema HDPE (*High Density Polyethylene*)  
(Sumber : Andrew, 2000)

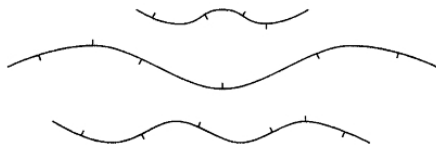
LDPE (*Low Density Polyethylene*) adalah sebuah polimer yang mengandung cabang dengan konsentrasi yang kuat dan berguna untuk menghalangi proses kristalisasi, serta hasilnya memiliki densitas yang relatif rendah. Cabang utamanya dan beberapa cabang pada rantai utamanya terdiri dari golongan butil dan etil. Rantai cabang yang panjang terjadi pada jarak yang acak sepanjang rantai utamanya. LDPE memiliki densitas antara 0,90-0,94 g/cm<sup>3</sup>. Plastik LDPE umumnya digunakan untuk *diaper backing*, *shrink-wrap*, tas *dry cleaning*, dan *flexible pipe* (Andrew, 2000). Skema LDPE dapat dilihat pada gambar II.8 :



**Gambar II.8.** Skema LDPE (*Low Density Polyethylene*)  
(Sumber : Andrew, 2000)

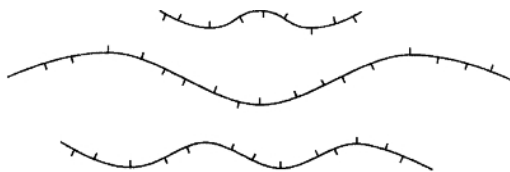
LLDPE (*Linear Low Density Polyethylene*) adalah suatu polimer yang memiliki resin yang mengandung molekul dengan rantai *polyethylene* linear yang dekat dengan golongan alkil pendek dengan jarak yang acak. Umumnya, rata-rata pemecahan rantai cabangnya terjadi antara rantai 25-100 atom karbon

sepanjang rantai utamanya. LLDPE ini memiliki densitas antara  $0,9-0,94 \text{ g/cm}^3$ . Plastik LLDPE umumnya digunakan untuk karung, *stretch-wrap*, balon, dan wadah penyimpanan makanan. (Andrew, 2000). Skema LLDPE dapat dilihat pada gambar II.9 :



**Gambar II.9.** Skema LLDPE (*Linear Low Density Polyethylene*)  
(Sumber : Andrew, 2000)

VLDPE (*Very Low Density Polyethylene*) atau yang biasa disebut dengan ULDPE (*Ultra Low Density Polyethylene*) adalah sebuah bentuk istimewa dari LLDPE yang memiliki konsentrasi tinggi pada cabang rantai pendek. Umumnya, pemisahan rantainya terjadi pada rantai 7-25 atom karbon. Densitas yang dimiliki VLDPE antara  $0,86-0,90 \text{ gr/cm}^3$ . Plastik VLDPE umumnya digunakan untuk *medical tubing*, kemasan pembungkus daging, dan *diaper backing*. (Andrew, 2000). Skema VLDPE dapat dilihat pada gambar II.10 :

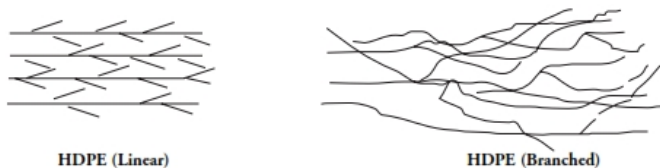


**Gambar II.10.** Skema VLDPE (*Very Low Density Polyethylene*)  
(Sumber : Andrew, 2000)

### II.1.3. HDPE (*High Density Polyethylene*)

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah HDPE (*High Density Polyethylene*). Menurut Lester H. Gabriel, HDPE merupakan sebuah bahan termoplastik yang terbentuk dari atom karbon dan hidrogen yang bersatu dan membentuk berat molekul produk yang tinggi. Kemudian, dengan aplikasi panas dan tekanan, maka terbentuk *polyethylene*. Rantai polimer yang terbentuk sekitar 500.000 hingga 1.000.000 panjang unit karbon. Panjang atau pendek rantai samping berada pada rantai utama molekul. Semakin panjang rantai utamanya, maka nomor atom dan berat molekulnya adalah yang terbaik. HDPE memiliki proporsi kristal (dengan beberapa cabang) yang baik daripada LDPE (*Low Density Polyethylene*). Sehingga, densitas dan ketahanannya sangat baik.

Pada HDPE, rantai molekul tidak akan bertabrakan satu sama lain dan plastik akan mengalami pelelehan dengan aplikasi jumlah panas yang cukup, sehingga resin termoplastik akan terbentuk. Berdasarkan sifat mekaniknya, HDPE adalah bahan viskoelastik non-linear dengan sifat bergantung terhadap waktu.



**Gambar II.11.** Skema HDPE Linear dan Bercabang  
(Sumber : Lester H. Gabriel)

Menurut WS Hampshire, Inc., HDPE memiliki dampak ketahanan yang sangat baik, ringan, rendah terhadap penyerapan air, dan memiliki daya renggang yang tinggi.

Berdasarkan WS Hampshire, Inc., berikut data-data sifat HDPE :

- |    |                                                       |                                |
|----|-------------------------------------------------------|--------------------------------|
| a. | Densitas                                              | : 0,95 g/cm <sup>3</sup>       |
| b. | Daya penyerapan air                                   | : 0%(per 24 jam)               |
| c. | Daya renggang                                         | : 4600 psi                     |
| d. | Perenggangan (yield)                                  | : 900 %                        |
| e. | Modulus fleksural                                     | : 200.000 psi                  |
| f. | Koefisien penambahan suhu linear                      | : 6 x 10 <sup>6</sup> in/in.°F |
| g. | Suhu panas defleksi                                   |                                |
|    | • Pada 66 psi                                         | : 170/76 °F/°C                 |
|    | • Pada 264 psi                                        | : 150/40 °F/°C                 |
| h. | Ketahanan dielektrik waktu singkat (ketebalan 1/8 in) | : 450-500 V/mil                |
| i. | Konstan dielektrik pada 1 kHz                         | : 2,30-2,35                    |
| j. | Faktor pemborosan pada 1 kHz                          | : 0,0002                       |
| k. | Volume hambatan pada 50 % RH                          | : 1015 ohm-cm                  |
| l. | Arc hambatan                                          | : 200-250 sec                  |

Plastik HDPE umumnya digunakan untuk karung, plastik tempat sampah, kontainer kosmetik, botol susu, botol obat-obatan, dan mainan anak-anak (Andrew, 2000).

## **II.2. Pirolisis**

### **II.2.1. Pengertian**

Pirolisis adalah suatu proses memecah ikatan kimia dari suatu senyawa hanya dengan menggunakan energi termal. Pirolisis analitis adalah teknik yang mempelajari pola perilaku molekul disaat pirolisis yang didasarkan pada fragmen molekular dari hasil pirolisis. Pirolisis akan menghasilkan beberapa macam molekul yang lebih kecil dari bahan yang molekulnya lebih besar. Sebagai hasilnya, GC (*Gas Chromatography*), *Mass Spectrometry*, *Fourier-Transform Infrared* (FT-IR) *spectrometry* dapat digunakan sebagai analisis dari sampel seperti polimer, biopolimer, komposit, dan material kompleks industri. Fragmentasi yang terjadi pada pirolisis analog dengan proses produksi dari *mass spectrum*, dimana energi dimasukkan ke

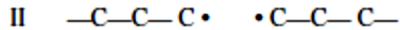
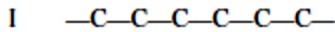
dalam sistem dan sebagai hasil molekul terpecah menjadi beberapa fragmen yang stabil. (Wampler, 2007)

Pirolisis adalah suatu metode yang memungkinkan untuk proses pendaurulangan plastik dalam skala besar. Hal tersebut dikarenakan banyak manfaatnya, ramah lingkungan, dan plastik yang bermacam-macam ataupun plastik sisa yang masih baik dapat diproses secara bersamaan. Selain itu, pirolisis dapat dicapai pada unit lokasi yang tidak terbatas, terutama yang dapat mengubah produk cairan menjadi bahan bakar berkualitas tinggi. (Aitziber, 2015)

### **II.2.2 Mekanisme Degradasi pada Pirolisis**

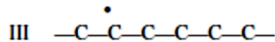
Degradasi dari molekul yang terjadi pada proses pirolisis yang disebabkan disosiasi dari ikatan kimia dan pembentukan radikal bebas. Fragmentasi pada pirolisis akan sesuai dengan tipe dari ikatan kimia yang terlibat dan stabilitas dari molekul yang lebih kecil yang terbentuk. Apabila subjek molekul hanya didasarkan pada rantai utama karbon, seperti pada sintetik polimer, dapat diperkirakan bahwa rantai akan terpecah secara acak menjadi molekul molekul yang lebih kecil dan mirip dengan molekul induknya. (Wampler.2007)

Terdapat beberapa jenis degradasi yang terjadi dalam proses pirolisis, salah satunya adalah *random scission*, yakni memecah rantai panjang suatu molekul seperti rantai utama hidrokarbon menjadi molekul-molekul yang lebih kecil secara acak. Jika semua ikatan antar karbon memiliki kekuatan yang hampir sama, tidak ada alasan untuk satu molekul terpecah lebih dari molekul yang lain, dan konsekuensinya fragmen polimer akan menghasilkan susunan lebar dari molekul-molekul yang lebih kecil. Ketika *polyethylene* (struktur I) dipanaskan akan menyebabkan terjadinya pirolisis, dimana akan memecah menjadi beberapa hidrokarbon yang mengandung beberapa jumlah karbon termasuk metana, etana, propana, dan lain-lain. Proses degradasi *random scission* dapat dilihat pada gambar II.12 :

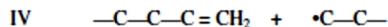


**Gambar II.12.** Mekanisme Degradasi saat Pirolisis  
(Sumber : Wampler, 2007)

Pemecahan rantai yang menghasilkan beberapa hidrokarbon dengan terminal radikal bebas (struktur II) dapat di stabilkan dengan beberapa cara. Jika radikal bebas mengintisarikan suatu atom hidrogen dari molekul lainnya maka hidrokarbon akan menjadi jenuh dan membentuk radikal bebas pada molekul lainnya yang hidrogennya telah diikat (struktur III). Struktur tersebut dapat distabilkan kembali dengan beberapa cara. Yang paling umum adalah *beta scission* dimana kebanyakan polimer akan terdegradasi dengan membentuk hidrokarbon tak jenuh dan terminal radikal bebas yang baru (struktur IV), seperti pada gambar II.13.

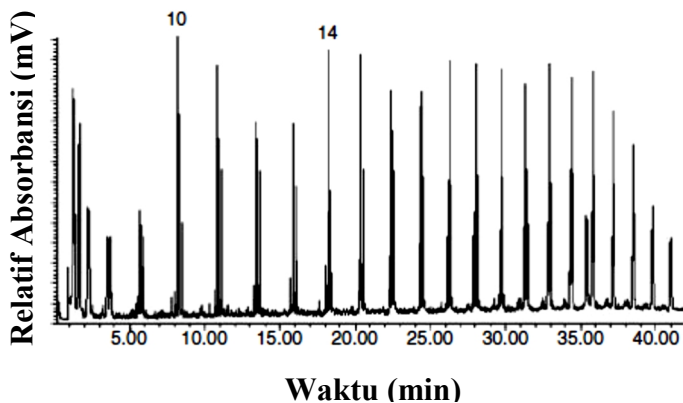


Beta scission      ↓



**Gambar II.13.** Mekanisme Degradasi saat Pirolisis  
(Sumber : Wampler, 2007)

Proses ini akan terus berlangsung dan akan membentuk molekul hidrokarbon yang jenuh dengan ikatan rangkap pada kedua ujung atau salah satunya. Ketika dianalisis menggunakan GC (*Gas Chromatography*) menunjukkan hasil seperti pada gambar II.14.



**Gambar II.14.** Pirogram dari *Polyethylene*  
(Sumber : Thomas P. Wampler, 2007)

Setiap tiga puncak yang ditunjukkan pada gambar menunjukkan adanya kandungan diena, alkana ataupun alkena dengan kandungan jumlah karbon yang spesifik.

## **II.2.3 *Microwave Heating Method***

### **II.2.3.1. Perbandingan *Microwave Method* dengan *Conventional Method***

Dalam penelitian ini, metode yang digunakan adalah pirolisis dengan menggunakan *microwave*. Menurut Andrea (2013), metode *microwave heating* memiliki kelebihan yang banyak dibanding dengan metode *conventional heating*, terutama pada lamanya proses dan distribusi panas. Perbedaan yang terjadi antara metode *microwave heating* dan *conventional heating* dapat dilihat pada tabel II.1:

**Tabel II.1.** Perbedaan yang Terjadi antara Metode *Microwave Heating* dan *Conventional Heating*

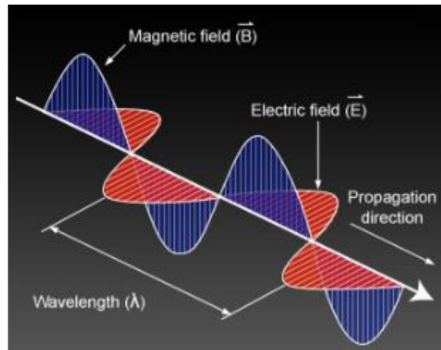
<b><i>Conventional Heating</i></b>	<b><i>Microwave Heating</i></b>
1. Reaksi berjalan lama (jam)	1. Reaksi berlangsung cepat (menit)
2. Transfer panas sangat susah dan konduktivitas suhu polimer rendah	2. Konduktivitas suhu polimer yang rendah kemungkinan bisa mengakibatkan peluapan dan proses pemanasan polimer sangat mudah
3. Efisiensi pemanasan susah dilakukan	3. Efisiensi pemanasan sangat tinggi
4. Setiap sumber bahan bakar kemungkinan digunakan	4. <i>Electrical power</i> sangat dibutuhkan
5. Tidak membutuhkan alat tambahan	5. Membutuhkan <i>microwave absorber</i>

(Andrea, 2013)

### **II.2.3.2. Proses Pemanasan dengan *Microwave***

Energi *microwave* tidak memanaskan ruangan, hanya memanaskan material tanpa menghasilkan gas emisi yang berbahaya yang dihasilkan dari sumber panas. Energi utamanya akan diserap oleh material yang diletakkan pada ruangan material. *Microwave* adalah gelombang elektromagnetik yang mempunyai panjang gelombang yang bervariasi dari 1 milimeter hingga 1 meter. (Scott Jones). Profil dari *microwave* dapat dilihat pada gambar II.15.





**Gambar II.15.** Profil *Microwave*  
(Sumber : Scott Jones)

Pemanasan dengan *microwave*, yakni menggunakan energi magnetik dengan frekuensi yang berkisar pada 300-3000 MHz, mampu memanaskan material dielektrik. Pemanasan dengan *microwave* umumnya sangat populer digunakan pada frekuensi yang diizinkan untuk aplikasi ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) dengan frekuensi mulai dari 915 – 2450 MHz. *Microwave oven* (*microwave* domestik) biasa digunakan pada frekuensi 2450 MHz. Pada pemanasan menggunakan *microwave* material akan dipanaskan sesuai dengan bentuk, ukuran, serta konstanta dielektrik material dan sifat alami dari *microwave* yang digunakan. Pada *microwave* dengan panjang gelombang 2450 MHz, mekanisme yang dominan untuk pemanasan dielektrik adalah *dipolar loss*, atau yang diketahui juga sebagai proses reorientasi dipolar. Ketika material mengandung *permanent dipole* mengikuti variasi medan elektromagnet, *dipoles* tidak akan mampu untuk mengikuti kecepatan pada medan magnet. Sebagai hasil dari fase ini, daya tidak teratur pada material. (Bradshaw, 1998).

Banyak aplikasi proses pemanasan membutuhkan suhu yang seragam pada material yang dipanaskan. Pencapaian tersebut sangat sulit dicapai menggunakan pemanasan *microwave*.

Pemahaman tentang mengapa pemanasan *microwave* biasanya menghasilkan suhu yang tidak seragam, dan sifat *non-uniformity* tersebut, dapat diperoleh dengan pertimbangan pemanasan mekanisme. Ketika dielektrik ditempatkan dalam medan *microwave*, energi dibuat tidak teratur dalam materi biasanya daya meluruh dengan diiringi meningkatnya penetrasi ke dalam dielektrik. Tanpa adanya material isolasi disekitar, panas akan hilang pada permukaan objek, dengan konveksi, dan radiasi. Melalui konduksi pada objek, panas akan tertransfer menuju pusat dari objek. Hasil bersih dari dua efek tersebut berupa profil suhu dengan variasi terhadap waktu. Sesaat setelah permulaan radiasi, suhu maksimum akan berada dekat pada permukaan. Sehingga, dengan bertambahnya waktu, posisi dari suhu maksimum berpindah pada interior objek. Profil akan terbentuk bergantung pada daya, medan elektrik, dielektrik, dan properti dari material. (Bradshaw, 1998).

#### **II.2.3.3. Prinsip Operasi *Microwave Oven***

Menurut Seong-Kyun Lee, *Microwave oven* atau *microwave* domestik biasanya digunakan untuk memanaskan makanan. *Microwave* adalah gelombang radio. Pada kasus *microwave oven*, umumnya digunakan gelombang radio kurang lebih 2500 MHz (2,5 GHz). Gelombang radio pada jangka frekuensi ini memiliki properti yang menarik. Gelombang ini diserap oleh air, lemak, dan gula. Ketika gelombang terserap maka gelombang terkonversi langsung menjadi gerakan atomik dan gerakan tersebut dikonversi menjadi panas. *Microwave* pada jangka frekuensi ini memiliki properti menarik yang lain yaitu gelombang sulit diserap oleh hampir semua jenis plastik, kaca, atau keramik. Metal akan memantulkan *microwave*, dimana metal akan menyebabkan percikan pada *microwave oven*. Alasan metal memantulkan *microwave* adalah tidak ada gelombang elektronik yang tinggal didalam konduktor dikarenakan konduktifitas dari konduktor adalah tak terhingga.

## **II.3. Katalis**

### **II.3.1 Pengertian Katalis Secara Umum**

Menurut Chorkendorff (2007), katalis adalah *workhorses* dari transformasi kimia dalam industri. Sekitar 85-90 % dari produk dalam industri kimia di produksi menggunakan proses katalitik. Katalis sangat diperlukan dalam produksi bahan bakar transportasi di salah satu kilang minyak dari sekitar 440 kilang minyak di seluruh dunia, produksi bahan kimia di seluruh cabang industri kimia, pencegahan polusi dengan menghindari pembentukan limbah (produk samping yang tidak diinginkan), dan pengurangan polusi dari kendaraan bermotor dan asap dari industri. Selain itu, katalis memiliki mekanisme energi untuk reaksi non-katalitik. Sehingga, memungkinkan untuk melakukan proses dengan tekanan dan suhu yang diinginkan.

Reaksi kimia yang dipercepat dengan katalis adalah reaksi katalitik. Biasanya, katalis yang digunakan mengubah laju reaksi termodinamikanya namun tidak mengubah posisi kesetimbangan termodinamikanya. Katalis pada umumnya berupa padatan atau cairan, namun memungkinkan juga jika berupa gas. (Deutschmann, 2009)

### **II.3.2 Katalis Homogen dan Heterogen**

Katalis homogen dan katalis heterogen mewakili subdisiplin dari katalisis tradisional. Katalitik homogen adalah rangkaian reaksi yang melibatkan katalis dalam fase yang sama dengan reaktan, dan umumnya menggunakan molekul organik, kompleks organologam, asam/basa, atau garam sebagai katalis. Umumnya, reaksi katalitik homogen telah merumuskan dengan baik situs aktif yang memberikan aktivitas dan selektivitas yang relatif tinggi. Namun, hampir semua proses katalitik homogen mengalami kesulitan dalam aplikasi skala besar termasuk daur ulang katalis, stabilitas, dan penanganan dalam proses industri. Katalis Heterogen tidak memiliki fase yang sama dengan reaktan. Khususnya katalis heterogen terlibat dalam penggunaan katalis padat dalam reaktan berfase cair dan gas. Oleh karena itu, katalis

heterogen menawarkan keuntungan, yaitu produk sudah terpisah dengan katalis dan katalis heterogen lebih stabil dibandingkan katalis homogen. Katalis heterogen selalu melibatkan perpindahan massa dan proses difusi diantara reaktan, produk, dan katalis padat. Bahkan, katalis heterogen lebih kompleks dengan situs aktif katalis dan mekanisme yang relevan dan belum dipahami dengan baik pada kebanyakan kasus. (Can Li, 2014).

Pada tabel II.2, menunjukkan hasil dari penelitian degradasi dari plastik HDPE menggunakan reaktor *batch* pada suhu 450°C. Performa pirolisis dengan zeolite ZSM-5 menghasilkan yield yang besar pada fraksi gas dan yield yang kecil pada fraksi cair ketika dibandingkan dengan *thermal cracking*. Sehingga, ketika ditambahkan zeolite yang lebih banyak, termasuk ZSM-5, menghasilkan efisiensi katalis pada proses *cracking*, *isomerization*, dan *aromatization* karena sifat asam kuat dan struktur kristal *microporous*. Zeolit ZSM-5 memiliki tiga dimensi struktur pori dengan ukuran pori 5,4 x 5,6 Å yang dapat menaikkan pemecahan pada molekul-molekul besar, diluar rasio Si/ Al tinggi yang dapat mempengaruhi kenaikan stabilitas *thermal* dan keasaman. Sehingga, degradasi pada permukaan luar dari katalis dapat terurai pada lubang kecil dari katalis menjadi gas hidrokarbon yang terdekomposisi (molekul dengan ukuran terkecil). (Almeida, 2015).

**Tabel II.2.** Yield pada *Thermal* dan *Catalytic Pyrolysis* dari HDPE menggunakan ZSM-5

<i>Product Yield (% wt.)</i>		<i>Thermal Pyrolysis</i>	<i>Catalytic Pyrolysis</i>
<i>Gas Fraction</i>		13,0	63,5
<i>Liquid Fraction</i>	Total	84,0	35,0
	C <sub>6</sub> -C <sub>12</sub>	56,55	99,92
	C <sub>13</sub> -C <sub>23</sub>	37,79	0,08
	>C <sub>23</sub>	5,66	0,0
<i>Solid Fraction</i>		3,0	1,5

(Almeida, 2015)

Katalis pada penelitian ini digunakan untuk dua fungsi, yaitu sebagai material yang membantu perpindahan panas dan sebagai katalis *thermal cracking*. Pada awal pemanasan reaktan berbentuk padatan. Namun, setelah dipanaskan maka reaktan berubah menjadi gas dan pada saat itulah katalis bekerja. Maka, katalis yang digunakan pada penelitian ini adalah katalis heterogen.

### **II.3.3. Katalis yang Digunakan pada Pirolisis**

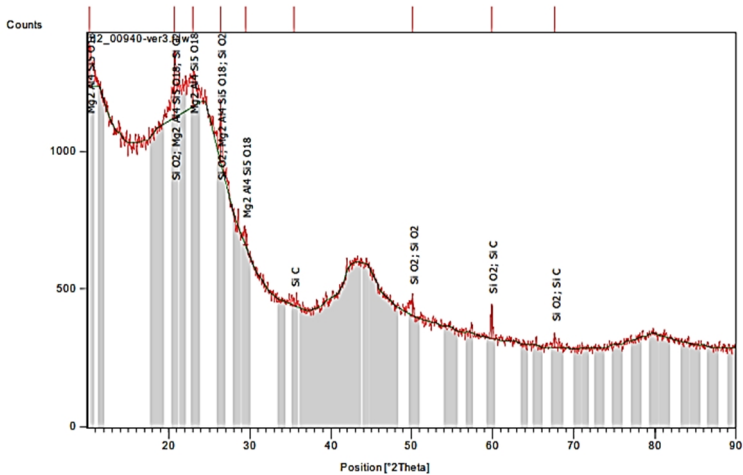
*Thermal pyrolysis* membutuhkan suhu yang tinggi karena *thermal conductivity* polimer yang kecil. Sehingga, hasilnya tidak terlalu selektif dan dimungkinkan untuk mengatasi masalah tersebut menggunakan katalis. Katalitik pirolisis adalah alternatif untuk mendaur ulang plastik campuran maupun murni. Katalis dapat mendukung reaksi dekomposisi dengan suhu yang rendah dan konsumsi energi yang lebih rendah, pemotongan biaya, kenaikan yield dengan nilai yang lebih tinggi, peningkatan kecepatan reaksi pemecahan, pencegahan pembentukan produk yang tidak diinginkan, dan pembentukan produk cair dengan jangka titik didih yang lebih kecil. Katalis homogen dan heterogen telah sering digunakan pada proses pemecahan polimer. Pada umumnya, katalis heterogen lebih sering digunakan karena pemisahan dan *recovery* yang lebih mudah.

Katalis homogen yang digunakan adalah Asam Lewis seperti  $\text{AlCl}_3$ , campuran *metal tetrachloroaluminatos* ( $\text{M}(\text{AlCl}_4)_n$ ), dimana metal yang digunakan seperti lithium, sodium, potassium, magnesium, kalsium atau barium dan  $n$  dapat bernilai 1 atau 2.

Katalis heterogen yang digunakan adalah zeolit, silica-alumina, alumina, dan katalis FCC (*Fluid Catalytic Cracking*), katalis mesostruktural (seperti : MCM-41, dan lain-lain), *nanocrystalline zeolites* (seperti : n-HZSM-5), dan lain lain. (Almeida. 2015)

II.3.4. Karakteristik Tempurung Kelapa

Dari hasil analisis ukuran partikel dari tempurung kelapa menunjukkan bahwa abu dari tempurung kelapa memiliki *Grain Fineness Number* (GFN) sebesar 75,08. Density dari abu tempurung kelapa adalah 2,05 g/cm<sup>3</sup> yang menunjukkan abu dari tempurung kelapa sangat ringan. (Madakson, 2012). Hasil dari analisis XRD dari abu tempurung kelapa ditunjukkan pada gambar II.16 dan Tabel II.3 dibawah ini :



Gambar II.16. Hasil Analisis XRD dari *Coconut-Shell Ash*  
(Sumber : Madakson, 2012)

Tabel II.3. Data Hasil Analisis dari *Coconut-Shell Ash*

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th]	Scale Factor	Chemical Formula
*	00-043-0596	44	Silicone Oxide	0,000	0,912	Si O <sub>2</sub>
*	00-013-0294	32	Cordierite, syn	0,000	0,590	Mg <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>5</sub> O <sub>18</sub>

*	01-089-1961	26	Quartz low, dauphinee- twinned	0,000	0,642	Si O <sub>2</sub>
*	01-075-1541	16	Moissanite 6\ITH\RG	0,000	0,207	Si C

(Madakson, 2012)

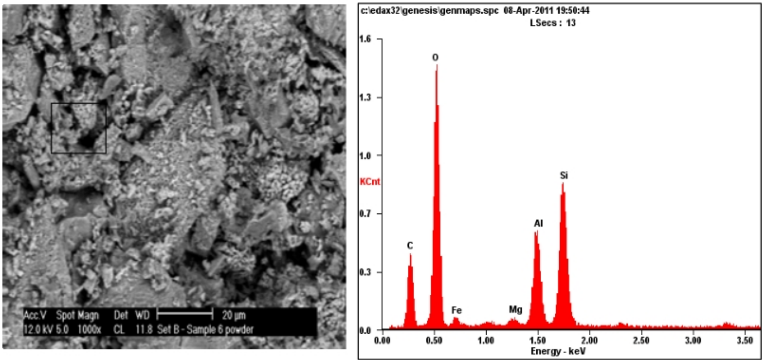
Hasil XRD menunjukkan bahwa SiO<sub>2</sub> merupakan presentase tertinggi dari semua elemen yang ditunjukkan pada analisis XRD. (Madakson, 2012). Selain itu, hasil dari analisis XRF dapat dilihat pada tabel II.4 yang menunjukkan komposisi senyawa yang terkandung pada abu tempurung kelapa.

**Tabel II.4.** Hasil Analisis XRF dari *Coconut-Shell Ash*

Element	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	MnO	ZnO
%	15,6	0,57	12,4	0,52	16,2	0,45	45,05	0,22	0,3

(Madakson, 2012)

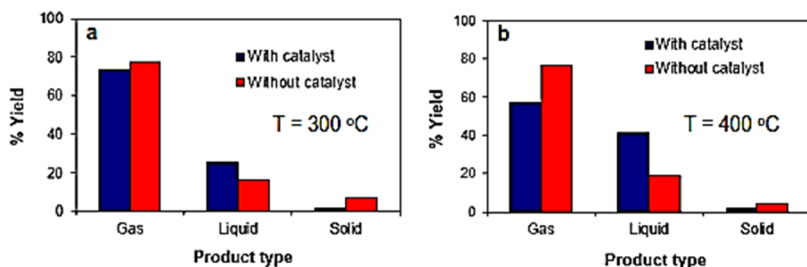
Untuk hasil analisis SEM/EDS dari abu tempurung kelapa dapat dilihat pada gambar II.17 dimana dari hasil analisis tersebut menunjukan bahwa morfologi dari abu tempurung kelapa sebagian besar tersusun dari Si, C, O, Mg, Al dan sebagian kecil dari Fe. (Madakson, 2012)



**Gambar II.17.** Hasil Analisis SEM/EDS dari *Coconut-Shell Ash*  
(Sumber : Madakson, 2012)

### II.3.5. Katalis Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa

Menurut Swee Kim Leong (2016), katalis karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa digunakan sebagai pemacu dari transfer panas dan *thermal cracking* dari proses pirolisis gliserol. Perbandingan performa proses pirolisis gliserol ditunjukkan pada suhu 300°C dan 400°C. Pada gambar II.18. ditunjukkan yield produk yang dihasilkan pada kedua suhu dengan dan tanpa katalis. Secara umum penambahan katalis pada proses mampu meningkatkan yield produk cair dan menurunkan yield produk gas pada kedua suhu. Pada suhu 300°C, penggunaan katalis mampu menurunkan yield produk gas hingga 4,2 % tetapi dapat meningkatkan produk cair hingga 9,2 %. Dari gambar II.18, diketahui terjadi perubahan yang signifikan jika suhu ditingkatkan hingga 400°C dengan yield produk gas yang menurun hingga 19 % dan yield produk cair meningkat hingga 22 %. Produk padat pun mengalami penurunan jumlah pada kedua suhu dengan penurunan berkisar pada angka 5 %. Fungsi dari katalis adalah untuk meningkatkan transfer panas dan memicu proses *thermal cracking* karena bahan dapat terurai dengan lebih sempurna dengan produk padat yang lebih sedikit dengan menambahkan katalis pada proses.



**Gambar II.18.** (a) Hasil Yield Proses Pirolisis Gliserol pada 300°C

(b) Hasil Yield Proses Pirolisis Gliserol pada 400°C  
(Sumber : Swee Kim Leong, 2016)



### II.3.6. Karakteristik Katalis *Coconut-Shell Activated Carbon* (CSAC)

Tabel II.5 menunjukkan bahwa limbah tempurung kelapa merupakan material karbon yang memiliki komposisi karbon yang tinggi serta sangat berpotensi untuk menjadi karbon aktif. Presentasi karbon meningkat secara signifikan setelah karbonisasi dan aktivasi untuk menjadi CSAC. (Iqbaldin,2013)

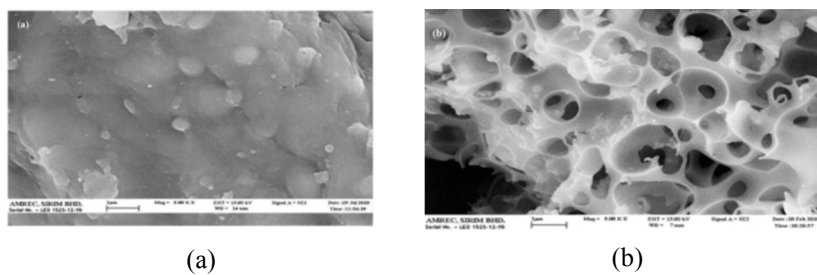
**Tabel II.5.** Analisis *Proximate* dan *Ultimate* dari Tempurung Kelapa/ *Coconut-Shell* (CS), *Coconut-Shell Carbon* (CSC), *Coconut-Shell Activated Carbon* (CSAC)

Analysis		CS	CSC	CSAC
Proximate				
Volatile matter	(%)	77,82	48,25	28,46
Fixed carbon	(%)	21,38	50,55	69,49
Ash content	(%)	0,8	1,20	2,05
Ultimate				
Carbon	(%)	49,62	64,87	80,13
Hydrogen	(%)	7,31	4,66	2,36
Nitrogen	(%)	0,22	0,84	1,10
Sulphur	(%)	0,10	0,09	0,06
Oxygen	(%)	42,75	29,54	16,35

(Iqbaldin, 2013)

Hasil dari SEM micrographs antara *Coconut-Shell Carbon* (CSC) dengan CSAC menunjukkan perbedaan yang sangat jauh pada morfologi permukaan dari keduanya yang ditunjukkan pada gambar II.19. Pada proses karbonisasi, bahan yang paling mudah menguap akan terlepas. Namun, tidak ada pori yang terbentuk sebelum adanya aktivasi. Meskipun demikian, pada CSAC ditemukan adanya lubang berongga dan hal itu bergantung pada jumlah materi yang mudah menguap dan dihilangkan serta dampak dari penggunaan *activating agent* pada material karbon. Berdasarkan *International Union of Pure and Applied Chemistry*, pori yang dikembangkan saat aktivasi karbon

diklasifikasikan menjadi 3 grup, yaitu mikropori ( <2 nm ), mesopori (2-50 nm), dan makropori (>50 nm). Dilihat pada tabel II.6 bahwa suhu aktivasi meningkat dengan meningkatnya waktu penyinaran. Luas permukaan dari CSAC lebih besar dari CSC. Pengaktifan kimiawi meningkatkan porositas dari permukaan CSAC hingga 1786,8 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> dibandingkan dengan CSC yang hanya memiliki luas permukaan 36,5 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>. Hal ini mengindikasikan bahwa proses aktivasi berhasil meningkatkan luas permukaan serta porositas dari turunan bahan organik yang telah dikarbonisasi. (Iqbaldin,2013)



**Gambar II.19.** Hasil Morfologi SEM dari *Coconut-Shell Carbon* (CSC) dan *Coconut-Shell Activated Carbon* (CSAC) dengan Waktu Radiasi *Microwave* yang Berbeda

(a) Sebelum Aktivasi; (b) Setelah Aktivasi

(Sumber : Iqbaldin, 2013)

**Tabel II.6.** Luas Permukaan dan Ukuran Pori *Coconut-Shell Carbon* (CSC) dan *Coconut-Shell Activated Carbon* (CSAC) dengan Waktu Radiasi *Microwave* yang Berbeda

Sample (Time)	Detected Suhue (°C)	Surface Area (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	Pore Size (nm)
CSAC 10 min	530	1244,0	2,3
CSAC 15 min	577	1311,1	2,5
CSAC 20 min	635	1768,8	2,7
CSAC 25 min	702	1536,2	2,8

CSAC 30 min	744	1399,8	2,9
CSC 20 min	399	36,5	3,7

(Iqbaldin, 2013)

#### II.4. Penelitian Terdahulu

Berikut merupakan daftar penelitian-penelitian terdahulu, antara lain :

1. Penelitian berjudul “*Properties of Coconut Shell Activated Carbon*” yang ditulis oleh MN Mohd Iqbaldin, I Khudzir, MI Mohd Azlan, AG Zaidi, B Surani, dan Z Zubri pada tahun 2013 yang menghasilkan bahwa tempurung kelapa (CS) memiliki kandungan karbon sebesar 49,62%, setelah dibakar (CSC) memiliki kandungan karbon sebesar 64,87%, dan setelah diaktivasi (CSAC) memiliki kandungan karbon sebesar 80,13%. Hasil terbaik dari CSAC adalah dengan waktu 20 menit dan suhu 635°C yang menghasilkan luas area permukaan 1768,8 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup> dan ukuran pori 2,7 nm.
2. Penelitian berjudul “Pengolahan Limbah Kemasan Plastik *Multilayer* LDPE (*Low Density Polyethylene*) dengan Menggunakan Metode Pirolisis Konvensional dan Pirolisis *Microwave*” yang ditulis oleh Arief Febrianto dan Diki Dinar Ramadhika pada tahun 2015 menghasilkan kondisi terbaik pada penelitian ini yaitu dengan metode pirolisis *microwave* dengan kondisi operasi 500°C dan waktu 60 menit yang hasilnya adalah *yield* padat sebesar 4,67%, *yield* cair sebesar 23,65%, dan *yield* CH<sub>4</sub> sebesar 30,41%.
3. Penelitian berjudul “*Production of Pyrolyzed Oil from Crude Glycerol Using a Microwave Heating Technique*” yang ditulis oleh Swee Kim Leong, Su Shiung Lam, Farid Nasir Ani, Jo-Han Ng, dan Cheng Tung Chong pada tahun 2016 dimana hasil dari penelitian tersebut adalah pada suhu 300°C, ketika

menggunakan katalis, produk gas menurun 4,2 % tetapi meningkatkan produk cair sebanyak 9,2 %. Pada suhu 400°C, ketika menggunakan katalis, produk gas menurun 19 % tetapi meningkatkan produk cair sebanyak 22 %. Ketika menggunakan katalis dapat menurunkan produk padat sebanyak kurang dari 5% pada pemanasan dengan kedua variabel suhu.

4. Penelitian berjudul “Pengaruh Penggunaan Katalis Zeolit Alam pada Pengolahan Limbah Plastik *Multilayer* LDPE (*Low Density Polyethylene*) dengan Menggunakan Metode Pirolisis *Microwave*” yang ditulis oleh Dana Husin Satria dan Pandu Jati Ramadhan pada tahun 2016 merupakan penelitian yang mengolah limbah plastik LDPE (*Low Density Polyethylene*) dengan suhu operasi 550°C dan waktu operasi 90 menit dengan metode pirolisis *microwave* menggunakan katalis zeolit alam menghasilkan *yield* padat sebesar 2,88%, *yield* cair sebesar 28,12%, dan *yield* gas sebesar 40%.

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **III.1. Tempat dan Waktu Penelitian**

Penelitian ini akan dilaksanakan di Laboratorium Pengolahan Limbah Industri, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada bulan Februari sampai bulan Juni 2017.

#### **III.2. Bahan dan Alat Penelitian**

##### **III.2.1. Bahan Penelitian**

Bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah limbah plastik HDPE dan katalis karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa.

##### **III.2.2. Alat Penelitian**

Alat yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah *furnace*, *beaker glass*, gelas ukur, pengaduk kaca, toples kaca, corong, labu leher dua (reaktor), *temperature indicator neck*, *thermo couple (temperature indicator)*, *outlet neck*, *microwave*, kondensor liebigh, *erlenmeyer*, pompa *vacuum*, dan *gas sampling bag*.

#### **III.3. Kondisi Operasi dan Variabel Penelitian**

##### **III.3.1. Kondisi Operasi**

1. Pengaktifan kembali katalis karbon aktif dari tempurung kelapa
  - a. Massa karbon aktif dari tempurung kelapa : 1 kg
  - b. Pembakaran karbon aktif dari tempurung kelapa  
Suhu : 700°C  
Waktu : 2 jam
  - c. Pengeringan karbon aktif dari tempurung kelapa  
Suhu : 110°C  
Waktu : 2 jam

2. Proses Pirolisis
  - a. Massa bahan baku (HDPE) : 125 gram
  - b. Tekanan : 1 atm (atmosfer)
  - c. Volume total reaktor : 500 mL
  - d. Ukuran bahan (HDPE) : 0,5 cm

### **III.3.2. Variabel Penelitian**

1. Massa HDPE = 125 gram
2. Rasio HDPE : CSAC = 1:0,4 ; 1:0,6 ; 1:1
3. Suhu = 250, 300, 350, 400 (°C)
4. Waktu = 15, 30, 45 (menit)

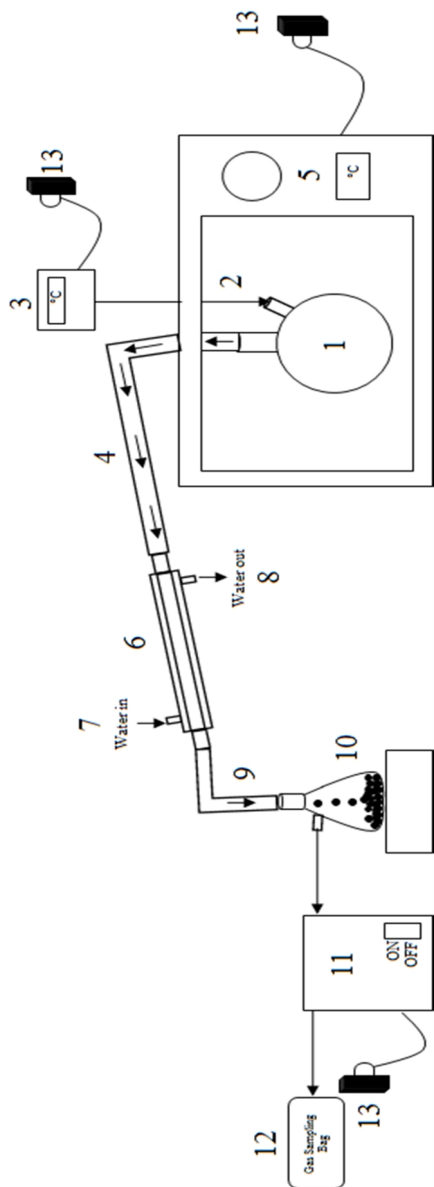
### **III.4. Tahapan Metodologi Penelitian**

Tahapan metodologi penelitian yang akan dilaksanakan adalah sebagai berikut :

1. Rangkaian alat
2. Aktivasi kembali katalis karbon aktif dari tempurung kelapa
3. Pirolisis
4. Teknis analisis

#### **III.4.1. Rangkaian Alat**

Pada penelitian ini, digunakan alat pirolisis dengan *microwave heating* dengan rangkaian alat seperti pada gambar III.1 berikut ini :



**Gambar III.1 Rangkaian Alat Penelitian**

Keterangan Gambar :

1. Labu leher dua (reaktor)
2. *Neck connector* untuk *thermo couple*
3. *Thermo Couple*
4. *Neck connector* untuk *output* produk
5. *Microwave*
6. Kondensor Liebig
7. *Inlet* air pendingin
8. *Outlet* air pendingin
9. *Neck connector* untuk labu penyimpanan produk cair
10. Labu penyimpanan produk cair
11. Pompa *vacuum*
12. *Gas sampling bag*
13. *Stop contact*

#### III.4.2. Aktivasi Kembali Katalis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa

Karbon dari tempurung kelapa perlu untuk diaktifasi kembali sebelum digunakan sebagai katalis pada proses pirolisis. Proses aktivasi katalis pada penelitian ini dilakukan seperti pada gambar III.2 :



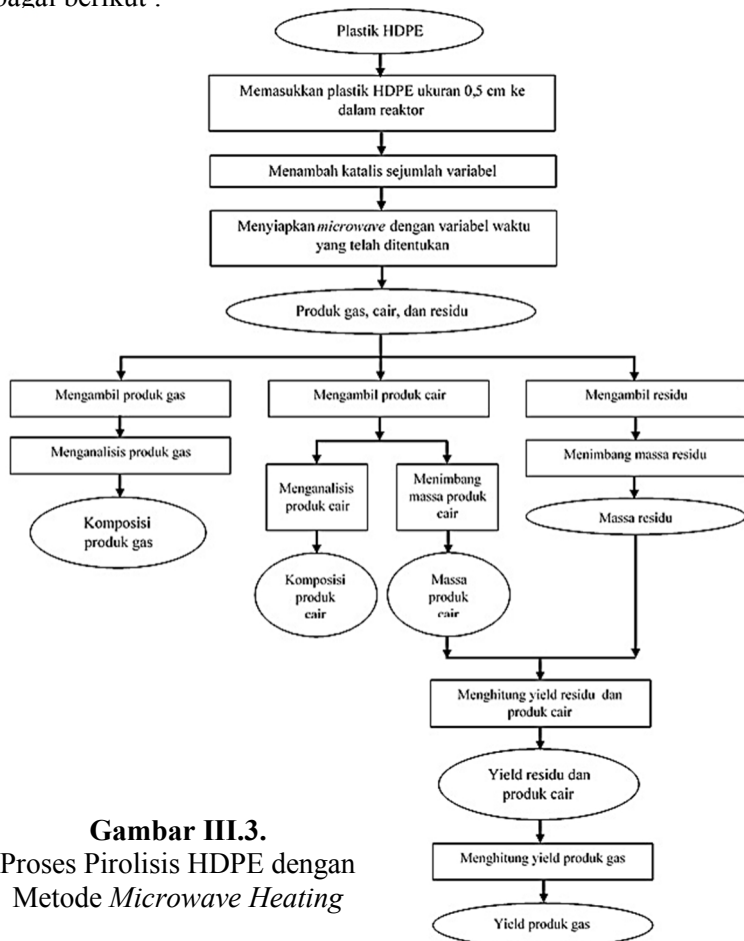
**Gambar III.2.** Langkah Pengaktifan Kembali Katalis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa



Menurut Riski (2014), syarat karbon dinyatakan aktif adalah ketika karbon aktif memiliki luas permukaan sebesar 300-3500 m<sup>2</sup>/ gram dan memiliki struktur amorf.

### III.4.3. Pirolisis

Pirolisis merupakan proses utama pada penelitian ini. Alat yang digunakan sesuai pada rangkaian alat pada gambar III.1. Proses yang dilakukan sesuai dengan flow chart pada gambar III.3 sebagai berikut :



**Gambar III.3.**  
Proses Pirolisis HDPE dengan  
Metode *Microwave Heating*

### **III.5. Teknik Analisis**

#### **III.5.1. Analisis Kandungan Bahan Baku (Plastik HDPE) Menggunakan FTIR (*Fourier Transform Infra Red*) dengan Merk “Thermo Scientific iS10”**

Analisis FTIR adalah salah satu metode untuk mendeteksi struktur molekul senyawa melalui identifikasi gugus fungsi penyusun senyawa (Mayang Sari, 2011)

#### **III.5.2. Analisis Kandungan dan Morfologi Katalis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa dan Hasil Produk Padat (Residu) Menggunakan SEM-EDX (*Scanning Electron Microscope- Energy Dispersive X-ray spectroscopy*) dengan Merk “Fei Inspect S50”**

Analisis SEM (*Scanning Electron Microscope*) dapat dimanfaatkan untuk mencari ketelitian tinggi untuk hampir semua bahan. SEM dapat di kombinasikan dengan EDX (*Energy Dispersive X-ray spectroscopy*) untuk menganalisis bagian elemen yang berbeda dari kandungan sampel. (www.glafo.se).

#### **III.5.3. Analisis *Surface Area* Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa Menggunakan BET (*Brunauer, Emmet, dan Teller*) dengan Merk “Quanthrome Novawin”**

Analisis BET ini menggunakan gas nitrogen (N<sub>2</sub>) pada temperature tertentu untuk menentukan kapasitas permukaan. Metode BET ini memprediksi nilai dari luas permukaan pada lapisan monolayer. (Ryan Hendra, 2008)

#### **III.5.4. Analisis Kandungan Gas Menggunakan GC (*Gas Chromatography*) dengan Merk “Agilent Hewliet Packard 6890 Series”**

Menurut Grob (2004), *gas chromatography* adalah teknik analisis yang unik dan berguna. Teknik ini digunakan untuk produk yang akan diidentifikasi dengan menggabungkan ke massa spektrometer ketika perbandingan *fingerprint* diperlukan.

Analisis GC ini dapat digunakan untuk pemisahan langsung dan analisis sampel gas.

### **III.5.5. Analisis Kandungan Produk Cair Menggunakan GC-MS (*Gas Chromatography – Mass Spectrometry*) dengan Merk “HP 6890 GC Method : Liquid 16 M”**

GC-MS merupakan metode pemisahan senyawa organik yang menggunakan dua metode analisis senyawa, yaitu kromatografi gas (GC) untuk menganalisa jumlah senyawa secara kuantitatif dan spektrometri massa (MS) untuk menganalisis struktur molekul senyawa analit. Dari GC-MS ini akan diperoleh data struktur senyawa yang terdeteksi. (eprints.undip.ac.id)

### **III.6. Pengolahan Data**

Konversi dari plastik HDPE menjadi cair, padat (residu), dan gas dapat dihitung dengan perhitungan sebagai berikut :

- a. Menghitung % yield cair

$$\% \text{ Yield Cair} = \frac{\text{Massa Liquid}}{\text{Massa Plastik}}$$

- b. Menghitung % yield residu

$$\% \text{ Yield Residu} = \frac{\text{Massa Residu}}{\text{Massa Plastik}}$$

- c. Mengitung % yield gas

$$\% \text{ Yield Gas} = 1 - (\% \text{ Yield Cair} + \% \text{ Yield Residu})$$

(Fazal Mabood, 2010)

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

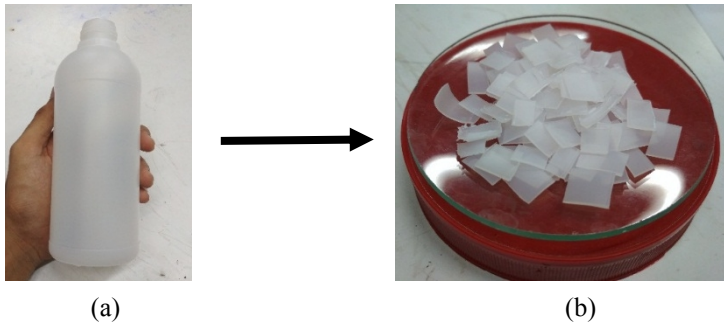
## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### IV.1 Analisis Bahan Baku dan Katalis

##### IV.1.1. Analisis Bahan Baku

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah HDPE (*High Density Polyethylene*). Menurut Lester H. Gabriel, HDPE merupakan sebuah bahan termoplastik yang terbentuk dari atom karbon dan hidrogen yang bersatu dan membentuk berat molekul produk yang tinggi. Menurut WS Hampshire, Inc, HDPE memiliki densitas  $0,95 \text{ g/cm}^3$ . Plastik HDPE umumnya digunakan untuk karung, plastik tempat sampah, kontainer kosmetik, botol susu, botol obat-obatan, dan mainan anak-anak (Andrew, 2000). Berikut adalah gambar sampel plastik HDPE sebelum dan sesudah di *pretreatment*:

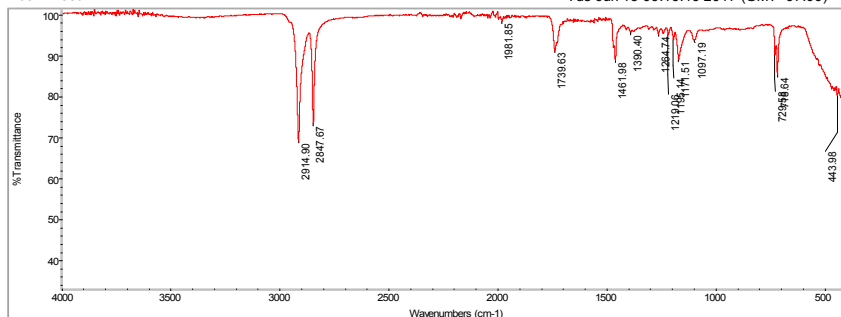


**Gambar IV.1.** Sampel Plastik HDPE  
(a) sebelum di *pretreatment* (b) sesudah di *pretreatment*

Kemudian, dilakukan analisa sampel plastik HDPE dengan menggunakan FTIR (*Fourier Transform Infra Red*). Berikut kurva hasil analisa sampel HDPE dengan menggunakan FTIR :

Title: Plastik HDPE

Tue Jun 13 09:16:46 2017 (GMT+07:00)



Plastik HDPE  
3495.26-455.13  
Correlation

Match	Compound name	Library
86.95	Polyethylene, low density	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
86.95	polyethylene	HR Nicolet Sampler Library
83.76	POLY(ETHYLENE), LOW DENSITY	Aldrich Condensed Phase Sample Library
83.58	Ethyl triacontanoate, 98%	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
82.58	Octadecanoic acid; Stearic acid	HR Hummel Polymer and Additives
81.85	Trtriacontane, 98%	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
81.09	Polyethylene, oxidized, low molecular weight	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
80.22	Beeswax, refined, Yellow	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
80.21	1-Triacontanol, 96%	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
79.89	Hexatriacontane, 98%	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II

**Gambar IV.2.** Hasil Analisis Sampel Plastik HDPE Menggunakan FTIR

Dari data hasil analisis tersebut diketahui bahwa plastik HDPE merupakan jenis *polyethylene*. Namun, terdapat beberapa komponen lain berupa senyawa hidrokarbon dengan gugus alifatik seperti *Ethyl triacontanoate*, *Trtriacontane*, *Octadecanoic acid*, *Beeswax*, *1-Triacontanol*, *Hexatriacontane* yang merupakan senyawa hidrokarbon dengan gugus alifatik. Dari pengulangan pembacaan yang menunjukkan kandungan *polyethylene*, dapat disimpulkan bahwa bahan yang digunakan dalam penelitian ini merupakan benar plastik yang memiliki jenis HDPE atau *High Density Polyethylene*.

Diketahui pula bahwa dalam pembuatan biji plastik HDPE ditambahkan anti oksidan berupa *BHT* (*3,5-diester-butil-4-hidroksitoluene*) dimana terdapat gugus aromatik didalamnya. (PT. Chandra Asri Petrochemical)

#### **IV.1.2. Analisis Katalis**

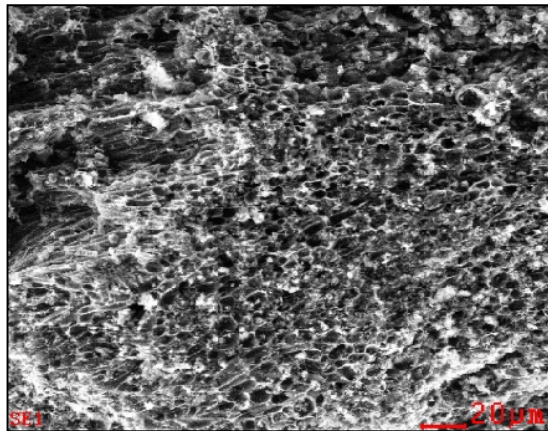
Menurut Swee Kim Leong (2016), katalis karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa (CSAC) digunakan sebagai pemicu dari transfer panas dan *thermal cracking* dari proses pirolisis. Umumnya, pada proses pirolisis menggunakan katalis zeolite yang memiliki kandungan Si dan Al yang tinggi namun memiliki harga yang kurang ekonomis. Akan tetapi, pada penelitian ini digunakan katalis karbon aktif dari tempurung kelapa (CSAC) yang memiliki harga ekonomis dan dari hasil analisa CSAC yang pernah dilakukan oleh Madakson (2012), CSAC mengandung  $Al_2O_3$  dan  $SiO_2$  yang sangat tinggi, sehingga sangat tepat digunakan untuk proses pirolisis ini. Limbah tempurung kelapa merupakan material karbon yang memiliki komposisi karbon yang tinggi serta sangat berpotensi untuk menjadi karbon aktif. (Iqbalidin,2013)

Fungsi dari katalis adalah untuk meningkatkan transfer panas dan memicu proses *thermal cracking* karena bahan dapat terurai dengan lebih sempurna dengan produk padat yang lebih sedikit dengan menambahkan katalis pada proses sesuai dengan jurnal Swee Kim Leong, 2016. Berikut adalah katalis karbon aktif dari tempurung kelapa (CSAC) yang digunakan dalam penelitian ini :



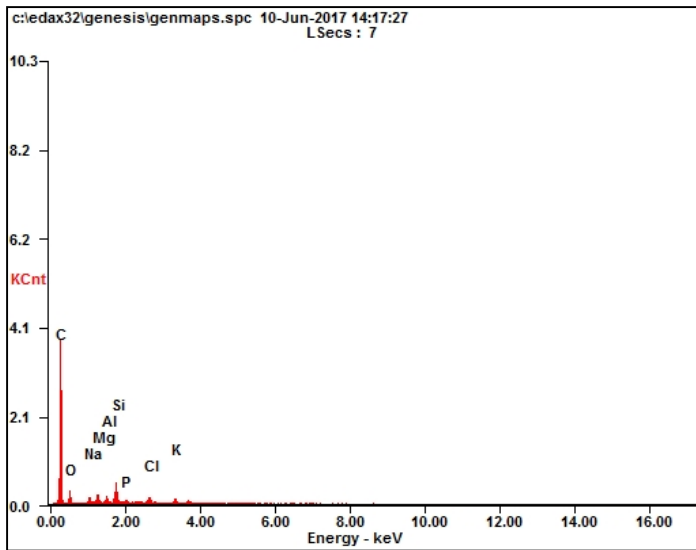
**Gambar IV.3.** Katalis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa (CSAC) yang digunakan pada Penelitian ini

Kemudian dilakukan analisa kandungan dari karbon aktif dari tempurung kelapa (CSAC) dengan menggunakan SEM/EDX (*Scanning Electron Microscope - Energy Dispersive X-ray spectroscopy*). Sehingga diperoleh hasil sebagai berikut :



(a)





(b)

**Gambar IV.4.** Hasil Analisis Katalis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa (CSAC) Menggunakan SEM/EDX pada Perbesaran 20  $\mu\text{m}$

(a) Morfologi Katalis CSAC (SEM)

(b) Kurva Kandungan Katalis CSAC (EDX)

Dari morfologi katalis yang dianalisis pada gambar IV.4 (a) dan (b) dan dari tabel A-19 pada appendix halaman A-23 diperoleh data katalis karbon aktif dari tempurung kelapa (CSAC) tersusun atas 68,49% unsur C; 15,68% unsur O; 1,49% unsur Na; 2,58% unsur Mg; 1,49% unsur Al; 5,08% unsur Si; 1,14% unsur P; 2,07% unsur Cl; dan 1,97% unsur K.

Dapat disimpulkan bahwa karbon aktif dari tempurung kelapa mengandung unsur Al dan Si, sehingga layak untuk digunakan sebagai katalis sesuai dengan jurnal Madakson, 2012. Pada gambar IV.4 (a) dapat dilihat bahwa morfologi dari karbon aktif memiliki banyak lubang yang mengindikasikan bahwa karbon

aktif merupakan amorf. Selain itu, persen berat dari unsur C sangat tinggi sesuai dengan Iqbaldin (2013) yang mengatakan bahwa nilai karbon akan meningkat seiring dengan proses aktivasi karbon aktif.

Selain itu, juga dilakukan analisa *surface area* untuk mengetahui keaktifan dari katalis karbon aktif dari tempurung kelapa (CSAC) dengan menggunakan uji BET (*Brunauer-Emmett-Teller*). Sehingga diperoleh hasil sebagai berikut :

```

Quantachrome Novawin - Data Acquisition and Reduction
for NOVA instruments
©1994-2007, Quantachrome Instruments
version 10.01

Analysis
Operator:ITS          Date:2017/06/20      Report
Sample ID: Bulloh    Filename:      Operator:ITS          Date:6/20/2017
Sample Desc: Serbuk   Comment:      C:\QCdata\Physisorb\17062001 CSAC.qps
Sample weight: 0.0218 g  Sample Volume: 0 cc
Outgas Time: 3.0 hrs    OutgasTemp: 300.0 c
Analysis gas: Nitrogen  Bath Temp: 77.3 K
Press. Tolerance:0.950/2.000 (ads/des)equil time: 60/60 sec (ads/des) Equil timeout: 120/120 sec (ads/des)
Analysis Time: 94.3 min End of run: 2017/06/20 5:22:02 Instrument: Nova Station A
Cell ID: 26
Adsorbate Nitrogen
Molec. Wt.: 28.013 g Temperature 77.350K Cross Section: 16.200 Å² Liquid Density: 0.808 g/cc

Relative Pressure      Volume @ STP      1 / [ W((Po/P) - 1) ]
P/Po                  cc/g
9.54540e-02           129.0979           6.5403e-01
1.50204e-01           129.0746           1.0957e+00
2.02672e-01           126.6443           1.6059e+00
2.53985e-01           124.6193           2.1859e+00
3.06230e-01           118.7087           2.9751e+00

BET summary
Slope = 10.900
Intercept = -4.953e-01
Correlation coefficient, r = 0.992342
C constant = -21.007
Surface Area = 334.711 m²/g

```

**Gambar IV.5.** Hasil Analisis Katalis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa (CSAC) Menggunakan BET

Dari tabel II.6, diketahui bahwa luas permukaan karbon dari tempurung kelapa (CSC) sebesar 36,5 m<sup>2</sup>/g (Iqbaldin, 2013) dan dari hasil analisis BET seperti pada gambar IV.5, luas permukaan pada karbon aktif dari tempurung kelapa (CSAC) yang digunakan pada penelitian ini sebesar 334,711 m<sup>2</sup>/g. Hal tersebut menunjukkan bahwa katalis karbon aktif dari tempurung kelapa (CSAC) sudah aktif dengan luas permukaan yang meningkat hampir 10 kali lipat. Hal tersebut juga sesuai dengan jurnal Rizki (2014) yang mengatakan bahwa luas karbon aktif berkisar antara 300-3500 m<sup>2</sup>/g.

## IV.2 Produk yang diharapkan dan Residu

Pada penelitian ini, terdapat dua produk yang diharapkan, yaitu produk cair (fraksi berat) dan produk gas (fraksi ringan). Produk cair merupakan fraksi berat hasil degradasi plastik HDPE pada proses pirolisis *microwave* yang kemudian dikondensasi sehingga berubah menjadi fase menjadi cair. Contoh produk cair yang di dapat dapat di lihat pada gambar IV.6 Produk cair ini berupa campuran senyawa hidrokarbon yang setiap penyusunnya memiliki karakteristik dan sifat masing-masing.



**Gambar IV.6.** Produk Cair Hasil Percobaan Pirolisis *Microwave*  
(a) Tampak Depan (b) Tampak Belakang

Secara umum, senyawa penyusun produk cair dikelompokkan menjadi 5 kelompok, yaitu : Cycloparaffin, n-Paraffin, Olefin, Alkana, dan Aromatik. Kelompok senyawa penyusun memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing sebagai penyusun bahan bakar cair diantaranya :

1. Cycloparaffin, merupakan senyawa siklis yang jenuh dan tidak reaktif sehingga kadar senyawa ini dalam bahan bakar sangat baik dan mampu meningkatkan nilai oktan pada bahan bakar.
2. n-Paraffin, merupakan senyawa hidrokarbon jenuh berantai lurus (alkana/ $C_nH_{2n+2}$ ) yang mempunyai keunggulan, yaitu kurang reaktif (susah bereaksi) tetapi dapat terbakar ketika mencapai titik bakarnya. Paraffin mempunyai *flash point* 73 – 160°C.
3. Olefin, merupakan kelompok senyawa hidrokarbon tidak jenuh,  $C_nH_{2n}$  yang cenderung tidak stabil sehingga

kadarnya harus dibatasi karena dapat mempengaruhi kualitas bahan bakar.

4. Alkuna, merupakan senyawa hidrokarbon tak jenuh berantai lurus  $C_nH_{2n-2}$  yang seharusnya tidak terdapat dalam bahan bakar karena dapat mempengaruhi kualitas bahan bakar.
5. Aromatik, merupakan senyawa hidrokarbon tak jenuh yang berantakan gugus benzene ( $C_6H_6$ ). Senyawa aromatik yang terlalu tinggi dari bahan bakar juga tidak diperbolehkan karena sifat senyawa tersebut yang memiliki titik nyala rendah akan mempengaruhi besarnya tekanan yang diberikan sebelum bahan bakar tersebut terbakar secara spontan. Senyawa aromatik juga bersifat racun dan karsinogenik sehingga berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan.

Dari keterangan diatas, dapat disimpulkan bahwa kandungan utama yang diinginkan pada produk cair adalah paraffin dan cycloparaffin. Oleh karena itu, untuk mengetahui kandungan hidrokarbon tersebut, dilakukan analisa menggunakan GC-MS (*Gas Chromatography – Mass Spechtrometry*) hasil dari analisis produk cair dapat dilihat pada appendiks tabel A.15 sampai dengan tabel A.17.

Produk gas dari proses pirolisis merupakan fraksi ringan hasil degradasi plastik HDPE menjadi senyawa hidrokarbon yang lebih sederhana melalui proses kondensasi namun tidak terkonden karena fraksi ringan memiliki *dew point* yang lebih rendah dari suhu kondensasi.

Spesifik produk gas yang diinginkan adalah metana, dikarenakan metana merupakan salah satu sumber energi atau bahan bakar yang ada berlimpah dan ada di alam seperti gas alam, biogas, gas *landfill*, dan sebagainya. (Bhoje, 2013)

Untuk mengetahui kandungan metana, digunakan analisa GC (*Gas Chromatography*). Sehingga, semakin banyak jumlah metana hasil produksi menunjukan proses yang semakin baik.

Hasil analisis produk gas ini dapat dilihat pada appendix tabel A.18.

Selain terdapat produk yang diharapkan, ada juga sisa dari percobaan berupa padatan (residu). Residu dari proses pirolisis *microwave* merupakan sisa degradasi plastik HDPE berupa padatan yang tidak dapat diuapkan yang terdiri dari senyawa hidrokarbon. Berikut produk padat (residu) hasil percobaan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar IV (a) dan IV (b) :



(a)



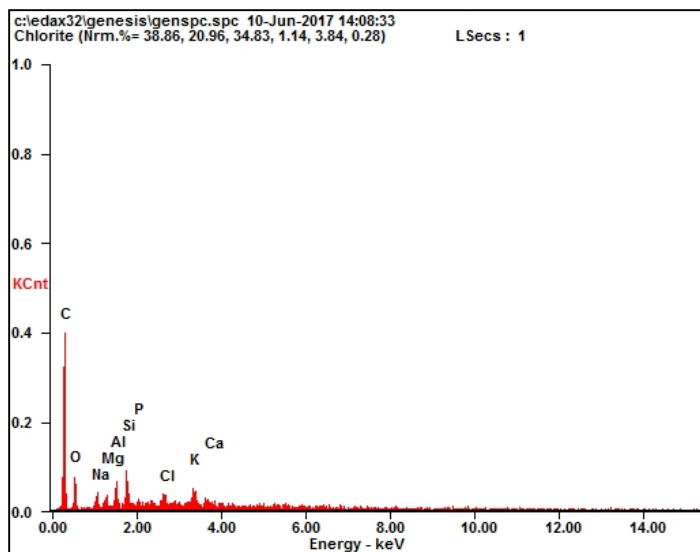
(b)

**Gambar IV.7.** Produk Padat (Residu) Hasil Percobaan Pirolisis  
*Microwave*

(a) Residu pada Suhu 300°C dan Waktu 15 Menit

(b) Residu pada Suhu 400°C dan Waktu 45 Menit

Untuk produk residu, dilakukan analisis untuk variabel terbaik, yaitu pada suhu 400°C, waktu 45 menit, dan jumlah katalis 125 gram (1:1) menggunakan EDX (*Energy Dispersive X-ray spectroscopy*). Seperti pada gambar IV.8 dan dari tabel A-20 pada appendix halaman A-24 diperoleh data residu tersusun atas 69,98% unsur C; 19,88% unsur O; 1,87% unsur Na; 1,94% unsur Al; 3,39 unsur Si; 1,42% unsur Cl; dan 1,52% unsur K.



**Gambar IV.8.** Hasil Analisis Produk Padat (Residu) Menggunakan EDX

Residu yang tersisa seharusnya merupakan *free ash*. Sehingga, hasil analisis unsur karbon yang terbaca adalah campuran dari karbon aktif dan residu. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar IV.4 (b) untuk hasil analisis kandungan karbon pada karbon aktif dari tempurung kelapa sebesar 68,49% dan pada gambar IV.8 untuk hasil analisis kandungan karbon dari produk padat (residu) sebesar 69,98%. Kenaikan akan jumlah karbon dalam analisis ini membuktikan bahwa residu berupa *free ash* benar adanya sebesar 1,49%

### **IV.3 Pengaruh Waktu Terhadap Hasil Pirolisis Microwave**

Pada penelitian yang telah dilakukan, terdapat pengaruh waktu terhadap yield dari produk maupun residu dan pengaruh waktu terhadap komposisi senyawa. Sehingga, diperoleh data seperti berikut ini :

#### IV.3.1. Pengaruh Waktu terhadap Yield

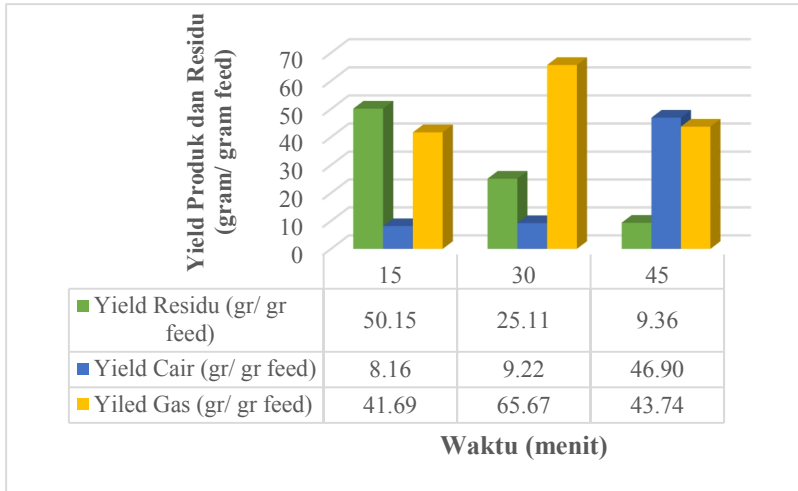
Hasil dari penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada gambar IV.9 yang menunjukkan pengaruh waktu terhadap yield dari residu, produk cair dan produk gas.

Dari grafik pada gambar IV.9, dapat dilihat bahwa pada variabel waktu 15 menit, untuk yield produk cair hanya 8,16 gram/ gram feed dan terus meningkat hingga pada variabel waktu 45 menit yield produk cair mencapai 46,9 gram/ gram feed. Sedangkan pada produk gas terjadi fluktuasi dari yield yang dihasilkan, seperti pada variabel waktu 15 menit ke variabel 30 menit, yield produk gas meningkat dari 41,69 gram/ gram feed menjadi 65,67 gram/ gram feed dan mengalami penurunan yield produk gas pada waktu 45 menit menjadi 43,74 gram/ gram feed. Hal ini diindikasikan bahwa pada awal waktu proses *cracking*, fraksi ringan yang mudah dilepas lebih banyak terbentuk sehingga jumlah yield produk gas meningkat. Namun, dengan bertambahnya waktu, tepatnya setelah 30 menit, jumlah fraksi ringan yang mudah dilepas mulai habis dan energi panas akan mulai memecah fraksi berat sehingga yield produk gas menurun dan yield produk cair bertambah dengan drastis.

Pada gambar IV.9 juga dapat dilihat bahwa yield residu terus berkurang mulai dari 50,15 gram/ gram feed pada waktu 15 menit hingga 9,36 gram/ gram feed pada waktu 45 menit. Hal ini disebabkan semakin lama waktu operasi, maka semakin banyak jumlah plastik yang terdegradasi oleh panas yang ditimbulkan pancaran gelombang mikro. Sehingga, dapat disimpulkan semakin lama waktu operasi, maka residu yang tersisa akan semakin sedikit karena jumlah plastik yang terdegradasi semakin banyak.

Sedangkan pada yield produk cair dan produk gas tidak terbentuk pola yang pasti hal ini dikarenakan proses *cracking* yang terjadi pada pirolisis *microwave* plastik HDPE merupakan proses *random scission*, yaitu memecah rantai panjang suatu molekul seperti rantai utama hidrokarbon menjadi molekul-molekul yang lebih kecil secara acak. Sehingga, pembentukan fraksi berat (produk cair) maupun fraksi ringan (produk gas) tidak dapat

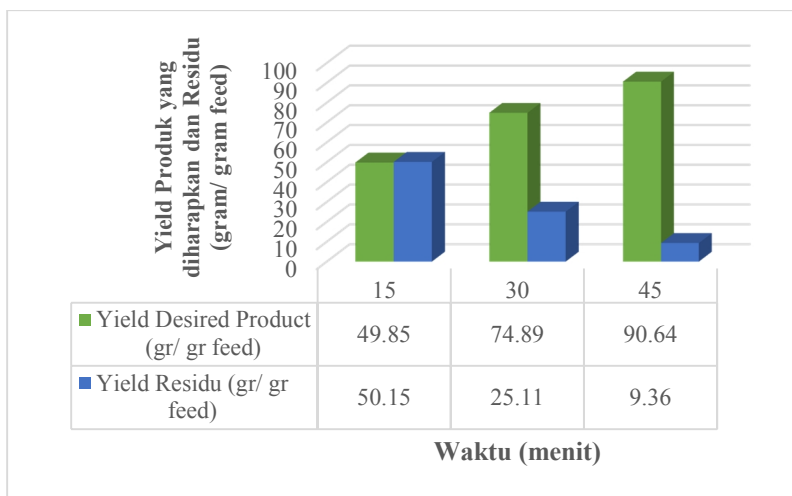
ditentukan dan yang menentukan merupakan katalis serta suhu operasi yang digunakan pada pirolisis. (Thomas P. Wampler, 2007)



**Gambar IV.9.** Pengaruh Waktu terhadap Yield Residu, Produk Cair, dan Produk Gas pada Suhu 300°C dan Katalis 75 gram

Namun, jika dilihat terbentuknya produk yang diharapkan (produk cair dan produk gas) dikarenakan pengaruh waktu maka jumlahnya akan meningkat seiring bertambahnya waktu operasi. Hal ini dapat dilihat pada gambar IV.10.





**Gambar IV.10.** Pengaruh Waktu terhadap Yield Residu dan Yield Produk yang diharapkan (Produk Cair dan Produk Gas) pada Suhu 300°C dan Katalis 75 gram

Dari grafik pada gambar IV.10 diatas, menunjukkan bahwa seiring bertambahnya waktu operasi maka produk yang diiharapkan (produk cair dan produk gas) akan semakin bertambah. Hal ini sesuai dengan Thomas P. Wampler (2007) bahwa dengan bertambahnya waktu operasi, maka total produk yang diharapkan (produk cair dan produk gas) akan meningkat dikarenakan semakin banyak plastik yang terdegradasi.

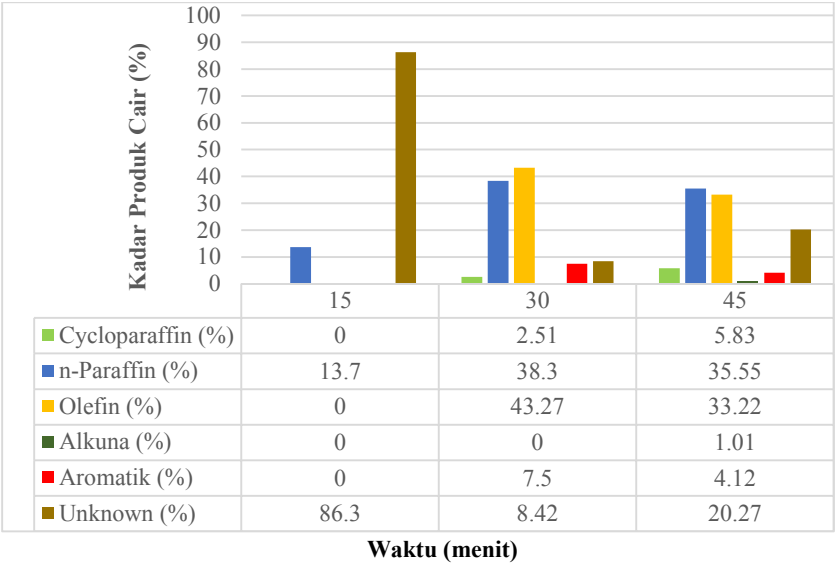
Dari semua variabel waktu yang digunakan, didapatkan waktu 45 menit sebagai waktu terbaik dengan yield hasil produk yang diharapkan (produk cair dan produk gas) yang paling banyak yaitu 90,64 gram/ gram feed dan yield residu paling sedikit yaitu 9,3 gram/ gram feed. Oleh karena itu, waktu 45 menit dijadikan variabel pada pengujian pengaruh suhu dan pengaruh jumlah katalis.

#### IV.3.2. Pengaruh Waktu terhadap Komposisi

Pengaruh waktu terhadap komposisi hasil dari penelitian ini dapat dilihat pada gambar IV.11. Pada grafik tersebut menunjukkan bahwa pada waktu 15 menit analisis produk cair hanya terdapat n-paraffin sebesar 13,7%. Hal ini dikarenakan banyak komponen dengan kualitas pengukuran hasil analisa sampel tidak cukup memiliki standar pengukuran minimum untuk kualitas yaitu dengan nilai minimum 85, sehingga tidak dapat dideteksi dan sebanyak 86,3% diindikasikan sebagai pengotor yang tidak dapat diidentifikasi. Pada gambar IV.11 juga dapat dilihat bahwa pada variabel 30 menit terbentuk aromatik sebanyak 7,5%, cycloparaffin sebanyak 2,51%, olefin sebanyak 43,27%, dan n-paraffin meningkat hingga 38,3%. Hal ini menunjukkan plastik sudah terdegradasi lebih sempurna sehingga mampu membentuk berbagai senyawa hidrokarbon. Dengan bertambahnya waktu, hidrokarbon akan terdegradasi menjadi cycloparaffin atau n-paraffin. Sedangkan cycloparaffin dan n-paraffin yang sudah terbentuk sebelumnya akan terdegradasi sebagian menjadi fraksi yang lebih ringan dan bisa jadi membentuk fraksi ringan gas hidrokarbon n-paraffin, seperti metana. Untuk fraksi yang cukup sulit terdegradasi akan mulai terbentuk seperti alkuna yang cenderung memiliki ikatan yang kuat dan sulit terbentuk. Hal tersebut terbukti dengan perubahan kadar pada variabel waktu 45 menit dimana cycloparaffin meningkat menjadi 5,83%, kadar olefin berkurang menjadi 33,22 %, terbentuk alkuna 1,01 % dan kadar n-paraffin berkurang menjadi 35,55%. Kualitas dari produk cair ditentukan pada jumlah cycloparaffin dan n-paraffin dan dari hasil analisis diatas dapat dilihat bahwa seiring bertambahnya waktu, komposisi yang diinginkan, yaitu cycloparaffin dan n-paraffin semakin banyak. Hal ini disebabkan semakin lama proses pirolisis maka proses *cracking* akan semakin banyak terjadi. Selain jumlah komposisi yang diinginkan semakin banyak, komposisi hidrokarbon yang tidak diinginkan seperti olefin dan aromatik semakin berkurang. Untuk komposisi selain yang disebutkan

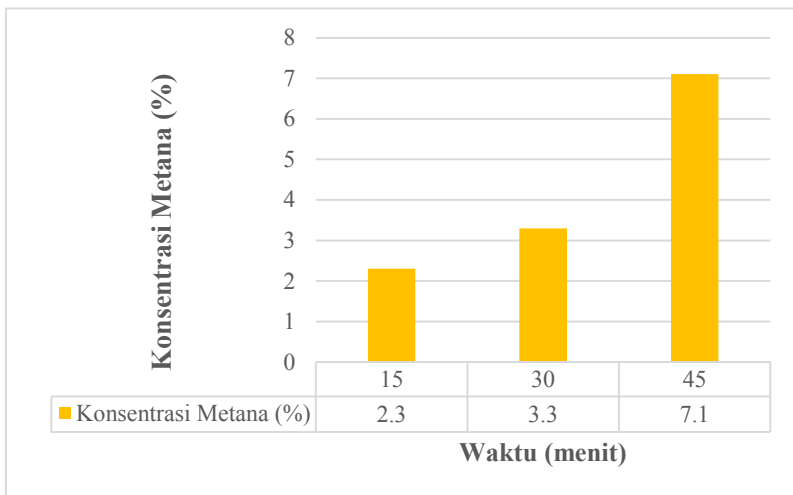
merupakan komposisi pengotor yang tidak diketahui spesifikasinya.

Kadar produk cair yang dapat terbaca pada analisa GC-MS untuk pengaruh waktu pada proses pirolisis ini sangat terbatas. Hal tersebut dikarenakan *peak* dengan nilai kualitas analisa dibawah 85 tidak dapat digunakan meskipun mengindikasikan suatu senyawa. Hal ini yang menyebabkan adanya proporsi *unknown* pada kadar produk cair. Pada dasarnya kadar *unknown* bisa jadi merupakan cycloparaffin, n-paraffin, olefin, alkuna, atau aromatik. Sehingga pengaruh jumlah *unknown* pada kadar produk cair terhadap kualitas produk juga tidak dapat dipastikan. Hal tersebut juga berlaku untuk pengaruh suhu maupun rasio HDPE : jumlah katalis terhadap kadar *unknown* yang sangat bergantung pada pembacaan analisa GC-MS.



**Gambar IV.11** Pengaruh Waktu terhadap Komposisi Produk Cair pada Suhu 300°C dan Katalis 75 gram

Untuk pengaruh waktu terhadap komposisi gas, dapat dilihat pada gambar IV.12. Komposisi metana bertambah seiring dengan bertambahnya waktu operasi. Hal ini disebabkan dengan semakin lamanya waktu operasi maka jumlah plastik yang terdegradasi semakin banyak sehingga mempengaruhi jumlah produk hasil degradasi.



**Gambar IV.12** Pengaruh Waktu terhadap Komposisi Produk Gas pada Suhu 300°C dan Katalis 75 gram

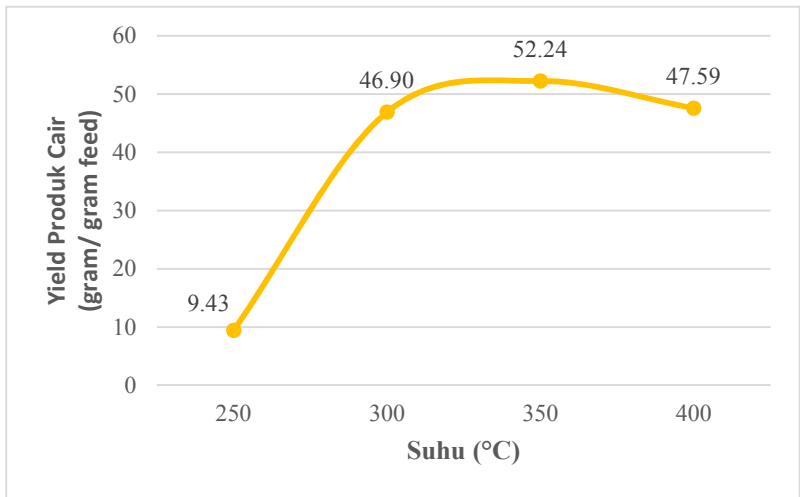
Sehingga dapat disimpulkan bahwa komposisi akan semakin baik seiring bertambahnya waktu operasi, serta dari penelitian yang telah dilakukan waktu terbaik yang didapat adalah 45 menit (jumlah katalis 75 gram dan suhu 300°C) dengan komposisi produk cair yang diinginkan mencapai 41,38 %, komposisi metana 0,071 gram metana/ gram gas (7,1 %), dan yield total produk mencapai 90,64 gram/ gram feed.

#### **IV.4 Pengaruh Suhu Terhadap Hasil Pirolisis Microwave**

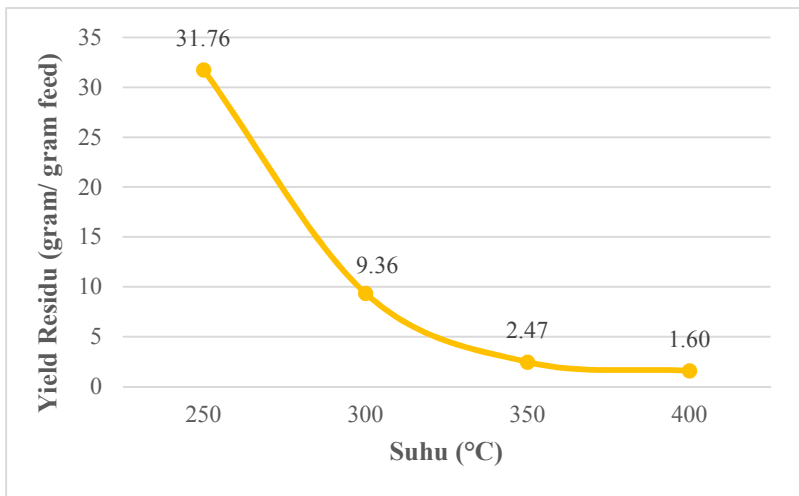
Pada penelitian yang telah dilakukan, terdapat pengaruh suhu terhadap yield dari produk maupun residu dan pengaruh suhu terhadap komposisi senyawa. Suhu pada proses pirolisis tidak dapat dioperasikan secara stabil pada satu titik suhu. Namun, dengan pengaturan daya gelombang mikro yang digunakan, maka dapat menurunkan ataupun meningkatkan suhu dalam proses pirolisis. Sehingga, suhu harus diatur secara berkala. Apabila suhu operasi melebihi dari suhu target yang seharusnya, maka daya gelombang mikro dikurangi dan sebaliknya. Oleh karena itu, suhu yang tercantum merupakan suhu target dengan suhu operasi pada proses penelitian pirolisis yang fluktuatif tetapi berkisar pada suhu target. Sehingga, diperoleh data seperti berikut ini :

##### **IV.4.1. Pengaruh Suhu terhadap Yield**

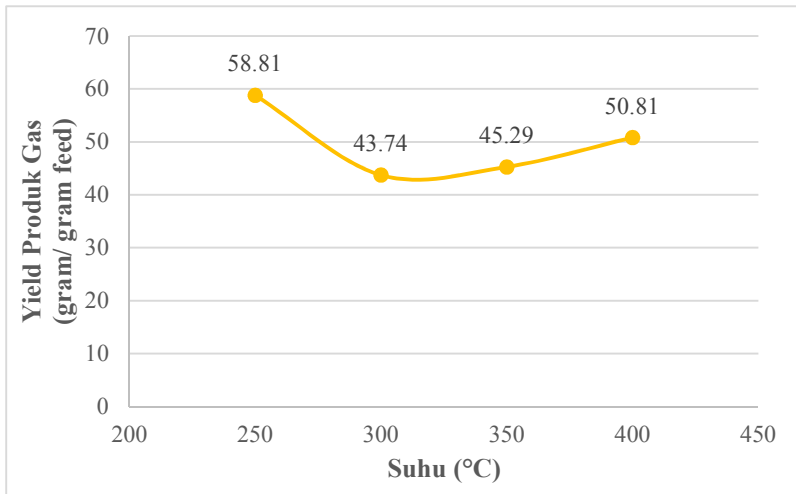
Hasil dari penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada gambar IV.13 yang menunjukkan pengaruh suhu terhadap yield residu, produk cair, dan produk gas. Dari gambar IV.13 (b) dapat dilihat bahwa seiring kenaikan suhu, yield residu semakin berkurang dari 31,76 gram/ gram feed pada suhu operasi 250°C menjadi 1,6 gram/ gram feed pada suhu operasi 400°C. Hal ini disebabkan semakin tinggi suhu operasi maka energi yang diberikan ke plastik untuk proses *cracking* semakin besar sehingga proses *cracking* lebih cepat dan merata. Namun, pada yield produk cair dan gas diperoleh hasil yang berbeda, Pada gambar IV.13 (a) dan (c), grafik untuk yield produk cair dan gas terjadi fluktuasi yield seiring kenaikan suhu. Untuk produk cair pada suhu operasi 250°C sampai 350°C, terjadi kenaikan yield dari 9,43 gram/ gram feed hingga 52,24 gram/ gram feed. Hal ini disebabkan pengaruh jumlah energi yang diberikan bertambah seiring kenaikan suhu operasi. Menurut Swee Kim Leong (2016), pada suhu rendah jumlah energi yang diberikan tidak terlalu banyak sehingga plastik HDPE hanya terdegradasi sebagian dan hasil yang terdegradasi lebih didominasi fraksi ringan yang lebih mudah dilepas dengan energi yang tidak terlalu banyak.



(a)



(b)



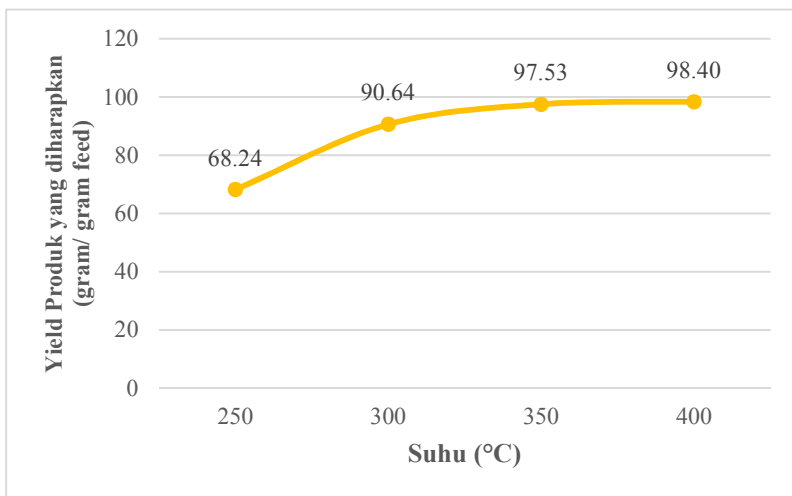
(c)

**Gambar IV.13** Pengaruh Suhu pada Waktu 45 menit dan Katalis 75 gram (a) terhadap Yield Produk Cair (b) terhadap Yield Residu (c) terhadap Yield Produk Gas

Namun pada suhu diatas 350°C terjadi penurunan yield produk cair hingga 47,59 gram/ gram feed pada suhu 400°C, diindikasikan jumlah energi menjadi berlebih, sehingga fraksi berat akan terpecah kembali menjadi fraksi ringan (produk gas) sehingga produk yang diharapkan pada fase gas akan bertambah. Selain itu, pada produk cair akan didominasi oleh hidrokarbon dengan jumlah rantai C yang lebih sedikit. Hal ini sesuai dengan Swee Kim Leong (2016) yang menyatakan bahwa pada satu titik suhu tertentu dalam proses pirolisis yield produk cair akan mengalami penurunan dan yield produk gas akan mengalami kenaikan karena jumlah energi berlebih dari proses yang terjadi.

Untuk menentukan suhu terbaik dari variabel yang telah dilakukan, dapat dibandingkan terbentuknya total produk baik itu gas maupun cair yang dapat dilihat pada gambar IV.14. Terlihat

bahwa semakin tinggi suhu, maka semakin tinggi pula yield total produk yang diharapkan (produk cair dan produk gas) yang dihasilkan. Dapat disimpulkan bahwa suhu terbaik adalah pada suhu 400°C dengan yield total produk yang diharapkan (produk cair dan produk gas) mencapai 98,40 gram/ gram feed.



**Gambar IV.14** Pengaruh Suhu terhadap Yield Produk yang diharapkan (Produk Cair dan Produk Gas) pada Waktu 45 menit dan Katalis 75 gram

#### IV.4.2. Pengaruh Suhu terhadap Komposisi

Pada gambar IV.15, dapat dilihat pengaruh suhu terhadap komposisi produk cair maupun produk gas, dimana pada suhu 250°C dapat dilihat bahwa tidak terdapat alkuna dikarenakan alkuna cenderung membutuhkan energi panas yang lebih besar untuk dapat terbentuk, selain itu terbentuk juga n-paraffin dengan kadar yang cukup banyak sebesar 47%. Hal tersebut dikarenakan n-paraffin mudah terbentuk dengan jumlah energi yang tidak terlalu besar. Selain itu, terbentuk olefin, tetapi jumlahnya lebih kecil dari n-paraffin yakni sebesar 37,78%. Hal ini diindikasikan terjadi



karena olefin pada dasarnya lebih mudah terbentuk, namun setelah terbentuk dapat terdegradasi kembali menjadi n-paraffin atau cycloparaffin. Cycloparaffin juga terbentuk sebesar 3,29%, terdapat pula kandungan aromatik sebesar 4,29% yang diduga berasal dari bahan antioksidan yang terkandung pada plastik HDPE yang memiliki gugus benzene didalamnya dan mengalami proses degradasi sehingga gugus aromatik dapat terbentuk. Jumlah aromatik yang terbentuk sangat bergantung pada jumlah antioksidan pada setiap sampel atau bahan dan cukup sulit untuk dikontrol jumlahnya. Kandungan aromatik sendiri cukup sulit untuk didegradasi menjadi senyawa yang lebih sederhana sehingga dapat dikatakan bahwa jumlah gugus aromatik yang terbentuk sangat bergantung pada kandungan antioksidan didalam bahan dan gugus aromatik tidak mengalami degradasi setelah terbentuk.

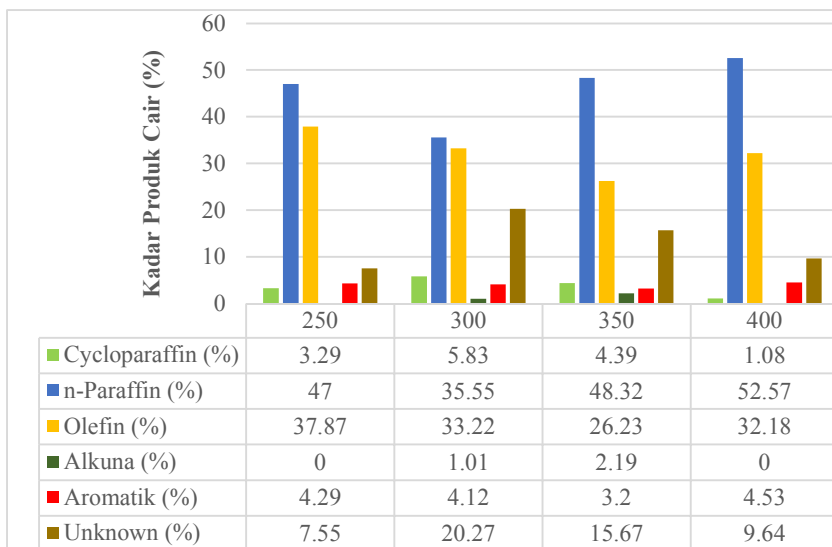
Selanjutnya pada suhu 300°C mulai terbentuk alkuna dikarenakan energi panas yang diperlukan cukup untuk menghasilkan alkuna walaupun dalam jumlah yang tidak terlalu besar yakni 1,01%. N-paraffin yang terbentuk pada suhu 300°C mengalami penurunan dibandingkan jumlah n-paraffin pada suhu 250°C, yaitu dari 37,87% menjadi 33,22%. Hal tersebut diindikasikan n-paraffin yang terbentuk banyak terdegradasi kembali menjadi hidrokarbon yang lebih sederhana dan membentuk gas dibuktikan dengan kandungan produk gas yang bertambah cukup banyak dari 0,052 gram metana/ gram gas (5,2%) menjadi 0,071 gram metana/ gram gas (7,1%), seperti yang tertera pada gambar IV.16. Olefin yang terbentuk mengalami penurunan kadar menjadi 33,22%. Hal ini dikarenakan terjadi degradasi dari olefin yang terbentuk dan dibuktikan dengan jumlah cycloparaffin yang terbentuk meningkat hingga 5,38%.

Pada suhu 350°C, alkuna yang terbentuk semakin meningkat menjadi 2,19% dengan bertambahnya jumlah energi yang diberikan. Olefin yang terbentuk turun hingga 26,23% dikarenakan jumlah energi yang lebih banyak maka olefin yang terbentuk akan banyak yang terdegradasi menjadi hidrokarbon yang lebih sederhana seperti n-paraffin atau cycloparaffin

dibuktikan dengan jumlah n-paraffin yang meningkat menjadi 48,32%.

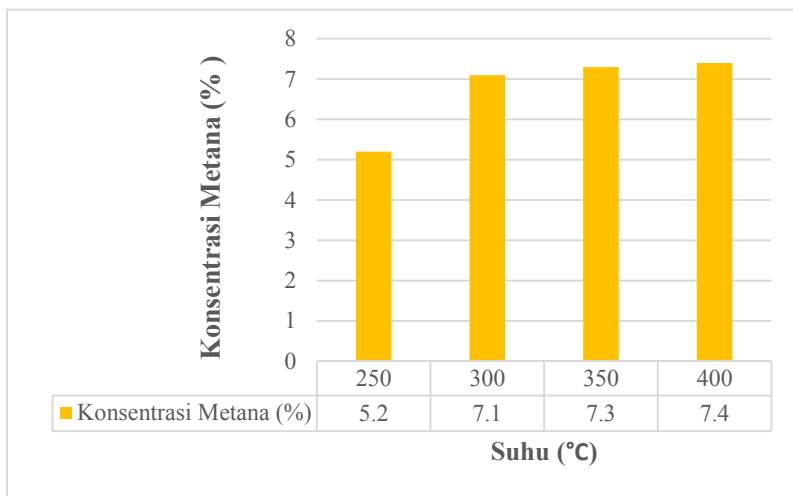
Pada suhu 400°C, energi panas yang diberikan semakin besar sehingga proses *cracking* yang terjadi lebih sempurna dan akan menyebabkan fraksi berat yang terbentuk banyak terdegradasi kembali menjadi senyawa yang lebih sederhana maka dari itu kandungan alkuna tidak ditemukan pada hasil dengan variabel suhu 400°C ini. Selain itu, jumlah n-paraffin dan olefin yang meningkat, dimana n-paraffin menjadi 52,57% dan olefin menjadi 32,18%.

Dari total kadar produk cair yang diharapkan, yakni cycloparafin dan n-parafin terjadi penurunan pada suhu 300°C. Namun, jika ditinjau ulang, yield yang dihasilkan pada variabel suhu 300°C terjadi kenaikan yang cukup drastis. Sehingga, meskipun kadar produk cair yang diharapkan pada 300°C berkurang, jumlah produknya lebih banyak dan terus meningkat seiring penambahan variabel suhu. Hal ini diindikasikan karena semakin tinggi suhu maka semakin besar pula energi panas yang dihasilkan dan mampu mendegradasi plastik menjadi hidrokarbon yang lebih sederhana seperti cycloparafin dan n-parafin.



**Suhu (°C)**  
**Gambar IV.15** Pengaruh Suhu terhadap Komposisi Produk Cair pada Waktu 45 menit dan Katalis 75 gram

Komposisi dari produk gas di tunjukkan pada gambar IV.16, dimana komposisi metana terus bertambah seiring dengan kenaikan suhu operasi. Hal ini dikarenakan semakin tinggi suhu operasi semakin besar energi yang diberikan untuk degradasi plastik menjadi fraksi yang lebih ringan sehingga jumlah fraksi ringan yaitu metana akan bertambah sesuai dengan Swee Kim leong (2016).



**Gambar IV.16** Pengaruh Suhu terhadap Komposisi Produk Gas pada Waktu 45 menit dan Katalis 75 gram

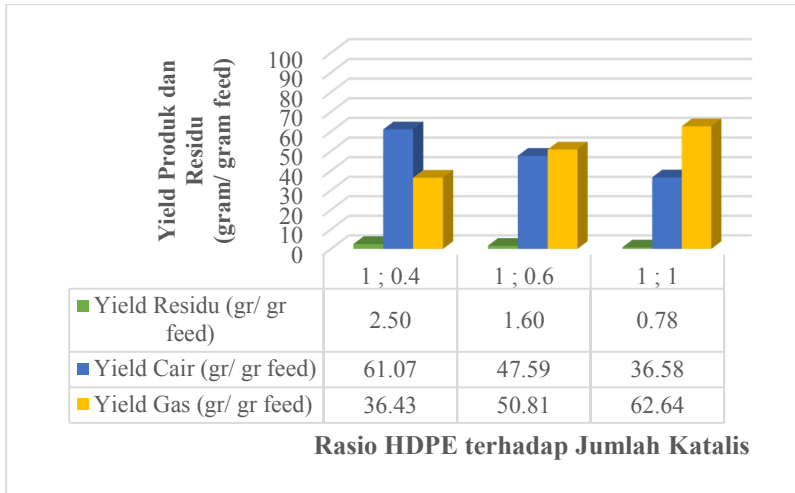
#### **IV.5. Pengaruh Jumlah Katalis terhadap Hasil Pirolisis Microwave**

Penambahan jumlah katalis merupakan hal penting dalam proses pirolisis. Karena dalam proses pirolisis *microwave* katalis berfungsi untuk meningkatkan proses perpindahan panas dan membantu proses *cracking* dari plastik HDPE. Sehingga, jumlah katalis yang digunakan akan berpengaruh terhadap hasil dari proses pirolisis yang dilakukan pada suatu penelitian. (Swee kim Leong, 2016). Pada penelitian yang telah dilakukan, terdapat pengaruh jumlah katalis terhadap yield dari produk maupun residu dan pengaruh jumlah katalis terhadap komposisi senyawa. Sehingga, diperoleh data seperti berikut ini :

#### IV.5.1. Pengaruh Jumlah Katalis terhadap Yield

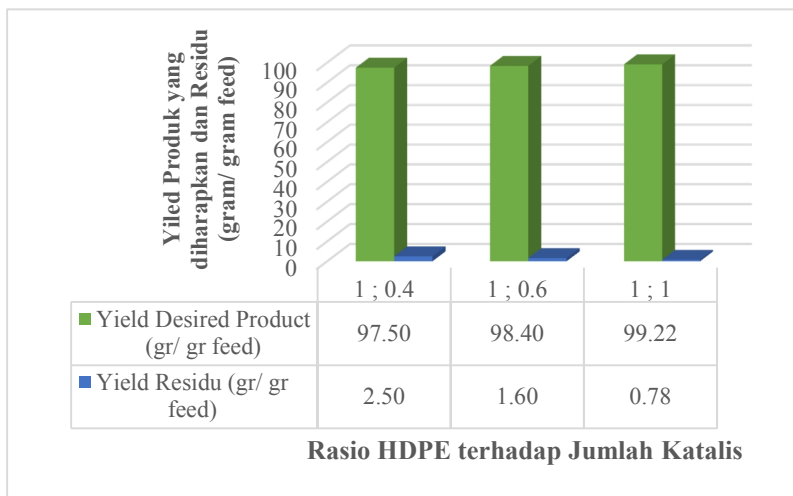
Pada gambar IV.17 dapat dilihat hasil pengaruh jumlah katalis terhadap yield produk gas, produk cair, serta residu. Gambar IV.17 menunjukkan bahwa jumlah residu semakin berkurang seiring bertambahnya jumlah katalis, yaitu dari 2,5 gram/ gram feed pada penggunaan rasio HDPE : jumlah katalis = 1:0,4 menjadi 0,78 gram/ gram feed pada penggunaan rasio HDPE : jumlah katalis = 1:0,6. Hal ini dikarenakan semakin banyak jumlah katalis maka proses perpindahan panas akan semakin mudah. Selain itu, proses *cracking* akan berlangsung semakin cepat sehingga degradasi plastik HDPE semakin maksimal yang dibuktikan dengan semakin sedikitnya jumlah residu pada akhir proses. Selain itu, gambar IV.17 menunjukkan jumlah yield produk cair yang semakin menurun dari rasio HDPE : jumlah katalis = 1: 0,4 sebesar 61,07 gram/ gram feed menjadi 36,58 gram/ gram feed pada rasio HDPE : jumlah katalis = 1:1. Hal tersebut berlawanan dengan yield produk gas yang terus meningkat seiring penambahan jumlah katalis. Hasil ini dapat terjadi karena penambahan jumlah katalis akan membantu proses *cracking* untuk mendapatkan fraksi yang lebih ringan. Dengan dominasi fraksi ringan pada produk cair, maka komposisi dari produk cair akan semakin baik meskipun jumlahnya berkurang. Selain itu jumlah produk gas yang dihasilkan juga semakin banyak dengan komposisi yang semakin baik seiring dengan penambahan jumlah katalis yang digunakan.

Sehingga sesuai dengan Almeida (2016), jika jumlah katalis bertambah, maka hasil yang di dapatkan akan cenderung membentuk fraksi ringan yang menyebabkan yield produk gas akan meningkat dan yield produk cair akan menurun.



**Gambar IV.17** Pengaruh Jumlah Katalis terhadap Yield Residu, Produk Cair, dan Produk Gas pada Suhu 400°C dan Waktu 45 menit

Namun jika ditinjau dari total produk yang dihasilkan, pada gambar IV.18 menunjukkan bahwa total produk akan meningkat seiring bertambahnya jumlah katalis. Hal ini dikarenakan semakin banyak jumlah katalis semakin mempermudah proses perpindahan panas dari proses pirolisis *microwave* dan mempermudah proses *cracking* dari plastik HDPE sehingga total produk yang dihasilkan akan semakin meningkat sesuai dengan Almeida (2016).



**Gambar IV.18** Pengaruh Jumlah Katalis terhadap Yield Residu dan Yield Produk yang diharapkan (Produk Cair dan Produk Gas) pada Suhu 400°C dan Waktu 45 menit

#### IV.5.2. Pengaruh Jumlah Katalis terhadap Komposisi

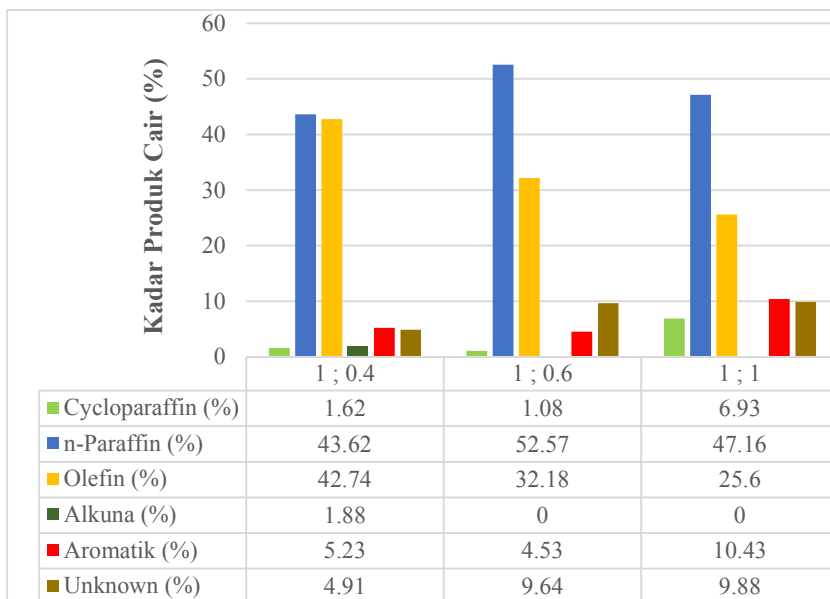
Pengaruh dari jumlah katalis terhadap komposisi dari produk cair dan gas dapat dilihat pada gambar IV.19 . Pada gambar IV.19 (a) untuk produk cair dan gambar IV.19 (b) untuk produk gas. Gambar IV.19 (a) menunjukkan adanya perubahan dari jumlah alkuna yang terbentuk. Pada penggunaan rasio HDPE : jumlah katalis = 1:0,4 terbentuk 1,88% senyawa alkuna dan tidak terbentuk pada penggunaan rasio HDPE : jumlah katalis = 1:0,6 dan 1:1. Hal ini terjadi karena dengan penambahan jumlah katalis yang digunakan dalam penelitian, rantai C dari bahan akan lebih cepat terpecah (*cracking*) dan mengakibatkan produk yang dihasilkan menjadi lebih didominasi fraksi yang lebih sederhana seperti paraffin dan cycloparaffin. Pada gambar IV.19 (a) juga dapat dilihat bahwa jumlah paraffin meningkat menjadi 52,57 % pada rasio HDPE : jumlah katalis = 1:0,6. Hal tersebut

diindikasikan bahwa peningkatan dari paraffin tersebut berasal dari pemecahan alkuna, olefin dan cycloparaffin. Dapat dibuktikan dengan berkurangnya jumlah dari masing-masing senyawa tersebut menjadi 0% untuk alkuna, 32,18% untuk olefin, 1,08% cycloparaffin. Selain itu, terdapat perubahan komposisi produk pada penggunaan rasio HDPE : jumlah katalis = 1:1 yaitu jumlah olefin yang berkurang menjadi 25,6 %, n-paraffin berkurang menjadi 47,16 % dan cycloparaffin bertambah menjadi 6,93 %. Dengan penambahan jumlah katalis pada penelitian yang dilakukan, maka proses akan berlangsung lebih cepat sehingga pembentukan fraksi yang sederhana akan semakin cepat, hal inilah yang menyebabkan beberapa perubahan komposisi pada kandungan senyawa diatas. Sebagai contoh, pada kadar olefin yang berkurang, diindikasikan olefin yang terbentuk sebelumnya terpecah (*cracking*) kembali membentuk cycloparaffin. Pada n-paraffin, jumlahnya yang berkurang diindikasikan membentuk fraksi n-paraffin yang lebih ringan seperti metana sehingga berubah fase menjadi gas dibuktikan dengan jumlah kadar metana yang meningkat menjadi 0,102 gram metana/ gram gas (10,2%) dari 0,074 gram metana/ gram gas (7,4%) terlihat pada gambar IV.19 (b).

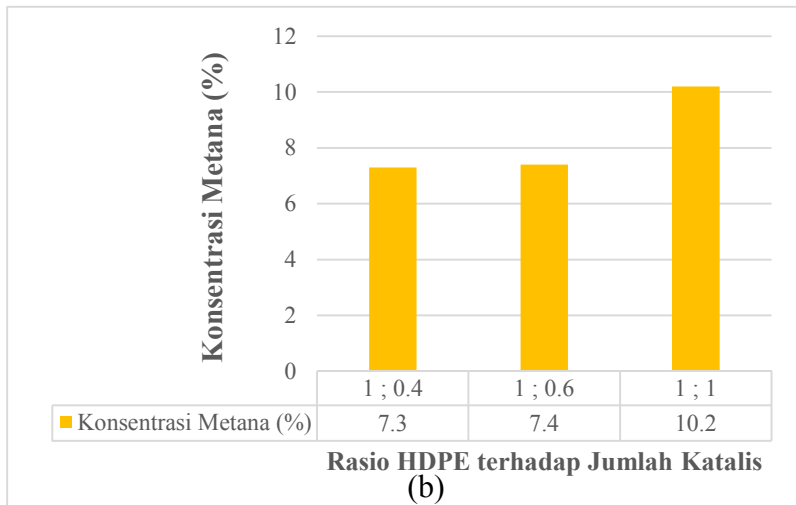
Dilihat dari komposisi produk yang diinginkan pada produk cair yakni cycloparaffin dan n-paraffin terlihat pada gambar IV.19 (a) bahwa terjadi kenaikan setiap penambahan jumlah katalis. Pada rasio HDPE : jumlah katalis = 1:0,4 terbentuk 45,24%, kemudian meningkat pada rasio HDPE : jumlah katalis = 1:0,6 terbentuk 53,65%, dan terjadi peningkatan lagi pada rasio HDPE : jumlah katalis = 1:1 terbentuk 54,09 %. Hal yang sama terjadi pada hasil produk gas dimana terjadi peningkatan komposisi dari produk yang diharapkan. Dimana pada rasio HDPE : jumlah katalis = 1:0,4 terbentuk 0,073 gram metana/ gram gas (7,3%), kemudian meningkat pada rasio HDPE : jumlah katalis = 1:0,6 terbentuk 0,074 gram metana/ gram gas (7,4%), dan terjadi peningkatan lagi pada rasio HDPE : jumlah katalis = 1:1 terbentuk 0,102 gram metana/ gram gas (10,2%).



Hal ini sesuai dengan Almeida (2016) dimana penambahan jumlah katalis akan membantu proses *cracking* untuk membentuk hidrokarbon yang lebih sederhana, dengan bertambahnya jumlah katalis maka pembentukan hidrokarbon yang lebih sederhana akan semakin mudah. Hal tersebut juga yang menyebabkan jumlah komposisi metana akan semakin bertambah seiring penambahan jumlah katalis pada proses pirolisis.



**Rasio HDPE terhadap Jumlah Katalis**  
(a)



**Gambar IV.19** Pengaruh Jumlah Katalis pada Suhu 400°C dan Waktu 45 menit (a) terhadap Komposisi Produk Cair (b) terhadap Komposisi Produk Gas

Dari hasil diatas didapatkan variabel rasio HDPE : jumlah katalis yang terbaik adalah 1:1 (125 gram HDPE : 125 gram katalis karbon aktif dari tempurung kelapa) dengan yield total produk mencapai 99,22 gram/ gram feed dengan komposisi yang diinginkan yaitu cycloparaffin dan n-paraffin sejumlah 54,09 % dan konsentrasi metana 0,102 gram metana/ gram gas (10,2%).

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **V.1 Kesimpulan**

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan :

1. Proses pirolisis dengan metode *microwave heating* dan menggunakan katalis karbon aktif dari tempurung kelapa dapat mengubah plastik HDPE menjadi bahan bakar alternatif dengan cara mendegradasi plastik HDPE.
2. Semakin lama waktu operasi, maka yield produk cair dan gas semakin baik, yaitu pada 45 menit dengan yield produk cair dan gas sebesar 90,64%; yield residu sebesar 9,36%; kadar komposisi produk cair (cycloparaffin dan n-paraffin) sebesar 41,38%; dan konsentrasi gas metana yang dihasilkan sebesar 7,1%.
3. Semakin tinggi suhu operasi, maka yield produk cair dan gas semakin baik, yaitu pada 400°C dengan yield produk cair dan gas sebesar 98,40%; yield residu sebesar 1,60%; kadar komposisi produk cair (cycloparaffin dan n-paraffin) sebesar 53,65%; dan konsentrasi gas metana yang dihasilkan sebesar 7,4%.
4. Semakin tinggi rasio HDPE : jumlah katalis, maka yield produk cair dan gas semakin baik, yaitu pada rasio 1:1 dengan yield produk cair dan gas sebesar 99,22%; yield residu sebesar 0,78%; kadar komposisi produk cair (cycloparaffin dan n-paraffin) sebesar 54,09%; dan konsentrasi gas metana yang dihasilkan sebesar 10,2%

#### **V.2 Saran**

1. Pengolahan limbah plastik HDPE menggunakan metode *microwave heating* sangat perlu untuk dikembangkan lagi agar hasil yang diperoleh lebih maksimal, yaitu

yield produk cair dan produk gas, serta komposisi produk cair dan produk gas.

2. Untuk menghasilkan produk cair yang maksimal, perlu dilakukan proses lanjutan untuk proses pemurnian seperti penggunaan proses distilasi bertingkat.
3. Microwave yang digunakan lebih baik terdapat pengatur suhu atau pengatur daya.

## DAFTAR PUSTAKA

- A., S. O. (2012, February). Preparation of a Locally Produced Activated Carbon from Coconut Shells and Its Use in Reducing Hexamine Cobalt (III). *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 3.
- Almeida, D., & Marques, M. d. (2015, August 31). Thermal and Catalytic Pyrolysis of Plastic.
- Ameer, A. A., Abdallh, M. S., Ahmed, A. A., & Yousif, E. A. (2013, January 23). Synthesis and Characterization of Polyvinyl Chloride Chemically Modified by Amines. *Open Journal of Polymer Chemistry*, 3, 11-15.
- Andrady, A. L. (2003). *Plastics And The Environment*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Anonim. (2013). *The Facts about PET*. Brussels: European Federation of Bottled Waters AISBL. Retrieved January 12, 2017
- Anonim. (2014). *Polystyrene*. American Chemistry Council, Inc. Retrieved January 12, 2017, from [www.chemicalsafetyfacts.org](http://www.chemicalsafetyfacts.org)
- Anonim. (n.d.). *An Introduction to PET*. New York: PET Resin Association. Retrieved January 12, 2017, from [www.petresin.org](http://www.petresin.org)
- Anonim. (n.d.). *Polyethylene*. IAPD Member. WS Hampshire, Inc. Retrieved January 9, 2017
- Anonim. (n.d.). *SEM/EDX Analyses*. Swedia. Retrieved January 10, 2017, from [www.glafo.se](http://www.glafo.se)
- Bradshaw, S. M., van Wyk, E. J., & de Swardt, J. B. (1998). Microwave Heating Principles and The Application to The Regeneration of Granular Activated Carbon. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*.
- Chorkendorff, I., & Niemantsverdriet, J. W. (2007). *Concepts of Modern Catalysis and Kinetics* (2 ed.). Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

- Deutschmann, O., Knozinger, H., Kochloefl, K., & Turek, T. (2009). *Heterogeneous Catalysis and Solid Catalysts*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Dogan, F. (2012). *Polypropylene*. Rijeka, Croatia: InTech.
- Erkiaga, A., Lopez, G., Barbarias, I., Artetxe, M., & Amutio, M. (2015). HDPE Pyrolysis-Steam Reforming in a Tandem Spouted Bed-Fixed Bed Reactor for H<sub>2</sub> Production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1.
- Gabriel, L. H. (n.d.). *History and Physical Chemistry of HDPE*.
- Grob, R. L., & Barry, E. F. (2004). *Modern Practice of Gas Chromatography* (4 ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Hayes, D., Iceman, D., & Green, D. (2013). *HPLC : High Pressure Liquid Chromatography*. Chem 413.
- Hendra, R. (2008). *Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Dasar Batubara Indonesia dengan Metode Aktivasi Fisika dan Karakteristiknya*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Iqbaldin, M. M., Khudzir, I., Azlan, M. M., Zaidi, A., Surani, B., & Zubri, Z. (2013). Properties of Coconut Shell Activated Carbon. *Journal of Tropical Forest Science*.
- Jones, S. (n.d.). *Comparing Microwave to Conventional Heating and Drying Systems*. Marion Mixers.
- Kalpajian, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufacturing Processes for Engineering Materials* (5 ed.). Pearson Education.
- Lee, S.-K. (n.d.). Principles of Microwave Oven.
- Leong, S. K., Lam, S. S., Ani, F. N., Ng, J.-H., & Chong, C. T. (2016). Production of Pyrolyzed Oil from Crude Glycerol Using a Microwave Heating Technique. *International Journal of Technology*, 323-326.
- Li, C., & Liu, Y. (2014). *Bridging Heterogeneous and Homogeneous Catalysis*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Mabood, F., Jan, M. R., Shah, J., Jabeen, F., & Hussain, Z. (2010, May 20). Catalytic Conversion of Waste Low Density

- Polyethylene into Fuel Oil. *Journal Iranian Chemical Research*, 123.
- Madakson, P. B., Yawas, D. S., & Apasi, A. (2012, March). Characterization of Coconut Shell Ash for Potential Utilization in Metal Matrix Composites for Automotive Applications. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 4.
- Muller, W. W. (2007). *HDPE Geomembranes in Geotechnics*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Peacock, A. J. (2000). *Handbook of Polyethylene (Structures, Properties, and Applications)*. New York, USA: Marcel Dekker, Inc.
- Rutuja Bhoje, G. R. (2013). Chemical Looping Combustion of Methane : A Technology Development View. *Journal of Energy*, 2013.
- Sari, M. (2011). *Identifikasi Protein Menggunakan Fourier Transform Infra Red (FTIR)*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Undri, A., Rosi, L., Frediani, M., & Frediani, P. (2013). *Microwave Pyrolysis of Polymeric Materials*, 208.
- Vinken, E. (2008). *Polyamides : Hydrogen bonding, the Brill transition, and superheated water*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- Wampler, T. P. (2007). *Applied Pyrolysis Handbook Second Edition*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## APPENDIKS

### A.1. Yield Produk Padat (Residu) Hasil Pirolisis Microwave

Misal : Pada variabel suhu 300°C dan waktu 15 menit  
 Massa sampel plastik HDPE = 125 gram  
 Massa katalis karbon aktif = 75 gram  
 Massa produk padat (Residu) = 62.77 gram

$$\text{Yield Padat} = \frac{\text{Massa Produk Padat (Residu)}}{\text{Massa Sampel Plastik HDPE}} \times 100\%$$

$$\text{Yield Padat} = \frac{62.77 \text{ gram}}{125 \text{ gram}} \times 100\%$$

$$\text{Yield Padat} = 50.15$$

**Tabel A.1.** Yield Produk Padat (Residu) Hasil Pirolisis Microwave

No.	Variabel		Massa Plastik HDPE (gr)	Massa Katalis Karbon Aktif (gr)	Produk Padat (Residu) (gr)	Yield Residu (%)
	Suhu (°C)	Waktu (Menit)				
1	300	15	125	75	62.77	50.15
2	300	30	125	75	31.47	25.11
3	300	45	125	75	11.72	9.36
4	250	45	125	75	39.75	31.76
5	350	45	125	75	3.09	2.47
6	400	45	125	75	2.00	1.60
7	400	45	125	50	3.13	2.50
8	400	45	125	125	0.97	0.78

## A.2. Yield Produk Cair Hasil Pirolisis Microwave

Misal : Pada variabel suhu 300°C dan waktu 15 menit

Massa sampel plastik HDPE = 125 gram

Massa katalis karbon aktif = 75 gram

Massa produk cair = 10.21 gram

$$\text{Yield Cair} = \frac{\text{Massa Produk Cair}}{\text{Massa Sampel Plastik HDPE}} \times 100\%$$

$$\text{Yield Cair} = \frac{10.21 \text{ gram}}{125 \text{ gram}} \times 100\%$$

$$\text{Yield Cair} = 8.16 \%$$

**Tabel A.2.** Yield Produk Cair Hasil Pirolisis Microwave

No.	Variabel		Massa Plastik HDPE (gr)	Massa Katalis Karbon Aktif (gr)	Produk Cair (gr)	Yield Cair (%)
	Suhu (°C)	Waktu (Menit)				
1	300	15	125	75	10.21	8.16
2	300	30	125	75	11.55	9.22
3	300	45	125	75	58.73	46.90
4	250	45	125	75	11.80	9.43
5	350	45	125	75	65.34	52.24
6	400	45	125	75	59.56	47.59
7	400	45	125	50	76.49	61.07
8	400	45	125	125	45.73	36.58

### A.3. Yield Produk Gas Hasil Pirolisis Microwave

Misal : Pada variabel suhu 300°C dan waktu 15 menit

Massa sampel plastik HDPE = 125 gram

Massa katalis karbon aktif = 75 gram

Yield produk padat (Residu) = 50.15 %

Yield produk cair = 8.16 %

Yield Gas = 100 % - (% Yield Produk Padat + % Yield Produk Cair)

Yield Gas = 100 % - (50.15 % + 8.16 %)

Yield Gas = 41.69 %

**Tabel A.3.** Yield Produk Gas Hasil Pirolisis Microwave

No.	Variabel		Massa Plastik HDPE (gr)	Massa Katalis Karbon Aktif (gr)	Yield Residu (%)	Yield Cair (%)	Yield Gas (%)
	Suhu (°C)	Waktu (Menit)					
1	300	15	125	75	50.15	8.16	41.69
2	300	30	125	75	25.11	9.22	65.67
3	300	45	125	75	9.36	46.90	43.74
4	250	45	125	75	31.76	9.43	58.81
5	350	45	125	75	2.47	52.24	45.29
6	400	45	125	75	1.60	47.59	50.81
7	400	45	125	50	2.50	61.07	36.43
8	400	45	125	125	0.78	36.58	62.64

#### A.4. Perbandingan Yield Padat, Gas, dan Liquid pada Semua Variabel

**Tabel A.4.** Yield Produk untuk suhu 300°C, katalis 75 gram, dan Berbagai Variabel Waktu

Produk	Yield (%)		
	15 menit	30 menit	45 menit
Padat (Residu)	50.15	25.11	9.36
Cair	8.16	9.22	46.90
Gas	41.69	65.67	43.74

**Tabel A.5.** Yield Produk untuk waktu 45 menit, katalis 75 gram, dan Berbagai Variabel Suhu

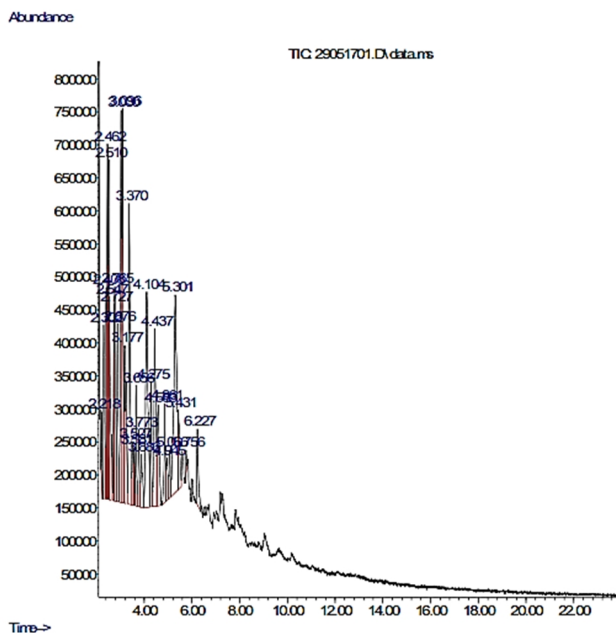
Produk	Yield (%)			
	250°C	300°C	350°C	400°C
Padat (Residu)	31.76	9.36	2.47	1.60
Cair	9.43	46.90	52.24	47.59
Gas	58.81	43.74	45.29	50.81

**Tabel A.6.** Yield Produk untuk suhu 400°C, waktu 45 menit, dan Berbagai Variabel Rasio Jumlah Katalis terhadap HDPE

Produk	Yield (%)		
	0.4	0.6	1
Produk (Residu)	2.50	1.60	0.78
Cair	61.07	47.59	36.58
Gas	36.43	50.81	62.64

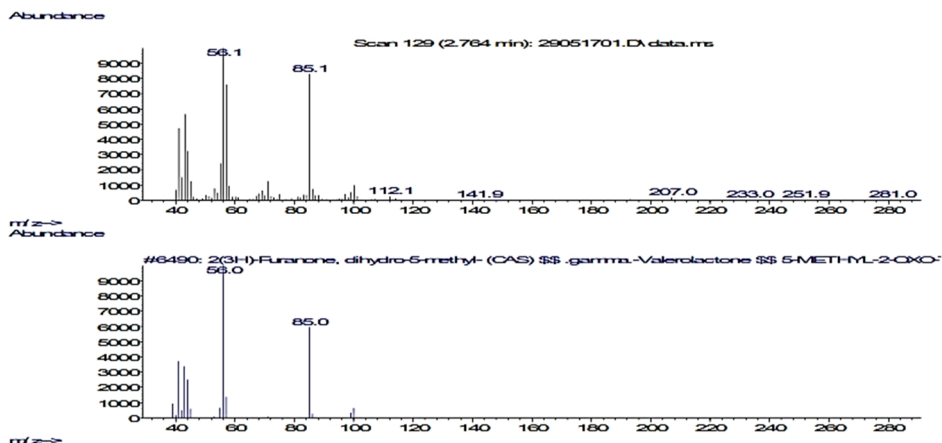
#### A.5. Hasil Analisis Kandungan Hidrokarbon pada Produk Cair Menggunakan GC-MS (*Gas Chromatography - Mass Spectrometry*)

Hasil analisis yang telah dilakukan di Laboratorium PT. Gelora Djaja, misal, untuk variabel suhu 300°C dan waktu 15 menit menunjukkan grafik antara *abundance* dan *retention time* untuk semua senyawa adalah sebagai berikut ;



**Gambar A.1.** Hasil Analisis Produk Cair menggunakan GC-MS untuk Variabel Suhu 300°C, Waktu 15 menit, dan Jumlah Katalis 75 gram

Kemudian, dari grafik diatas dipilah-pilah lagi berdasarkan per senyawa yang dihasilkan menurut *abundance* yang disesuaikan dengan *retention time* seperti grafik dibawah ini :



**Gambar A.2.** Hasil Analisis Produk Cair menggunakan GC-MS untuk Variabel Suhu 300°C, Waktu 15 menit, dan Jumlah Katalis 75 gram

Dari grafik pada gambar A.2, dari *software* GC-MS diperoleh pada *retention time* 2,764 menit dan pada *peak* 56 m/z diperoleh senyawa 2(3H)-Furanone. Kemudian, dilakukan perekapan dari hasil Analisis produk cair tersebut. Misal, untuk 2(3H)-Furanone merupakan senyawa turunan dari n-Paraffin yang memiliki kadar 3.93%.

Cara menentukan senyawa yang terbaca pada setiap *peak* adalah dengan melihat nilai kualitas minimumnya yaitu 85. Seperti gambar A.3 berikut ini :



## Laboratorium PT. Gelora Djaja

### Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\  
Data File : 29051701.D  
Acq On : 29 May 2017 13:55  
Operator : SRA  
Sample : 169/LU15 Sampel A  
Misc : M Iqbal - ITS  
ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST02.L  
C:\Database\Wiley275.L

Minimum Quality: 85  
Minimum Quality: 85

**Gambar A.3.** Hasil Analisis Produk Cair menggunakan GC-MS untuk Variabel Suhu 300°C, Waktu 15 menit, dan Jumlah Katalis 75 gram

Seperti pada sampel untuk variabel suhu 300°C, waktu 15 menit, dan jumlah katalis 75 gram seperti gambar A.4 berikut ini :

PK#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	2.219	0.75	C:\Database\Wiley275.L Pentanal (CAS) \$\$ n-Pentanal \$\$ n- Valeraldehyde \$\$ Valeral \$\$ Valera ldehyde \$\$ Valeric aldehyde \$\$ Val erianic aldehyde \$\$ Valerylaldehyd e yde \$\$ Valeric acid aldehyde \$\$ 1-pentanal \$\$ Valeryl aldehyde \$\$ n-C4H9CHO \$\$ Amyl aldehyde \$\$ Buty l formal \$\$ UN 20 BUTANAL \$\$ BUTYRALDEHYDE 1477 000123-72-8 43 .GAMMA.-D4-HEXAMETHYLENE OXIDE 7049 053778-65-7 40			49
8	2.764	3.93	C:\Database\Wiley275.L 2(3H)-Furanone dihydro-5-methyl- (3A)-6,6-gamma.-Valerolactone \$\$ 5-METHYL-2-OXO-TETRAHYDROFURAN \$\$ Valerolactone \$\$ 4-Pentanolide \$\$ 4-Valerolactone \$\$ .gamma.-Pentala ctone \$\$ 4-Hydroxyvaleric acid lac tone \$\$ 4-Methyl-gamma.-butyrolac	6490 000108-29-		86

**Gambar A.4.** Hasil Analisis Produk Cair menggunakan GC-MS untuk Variabel Suhu 300°C, Waktu 15 menit, dan Jumlah Katalis 75 gram

Dari gambar A.4 diatas, pada *peak* 1 nilai kualitasnya 49, sehingga tidak memenuhi nilai kualitas minimum dari senyawa hidrokarbon pada GC-MS tersebut. Akan tetapi, pada *peak* 8 nilai kualitasnya 86, sehingga memenuhi nilai kualitas minimum dari senyawa hidrokarbon pada GC-MS. Maka, senyawa pada *peak* 8 merupakan kandungan pada produk liquid pada penelitian ini berupa 2(3H)-Furanone dengan kadar 3,93 %.

Selain itu, pada beberapa *peak* terdapat jenis senyawa yang sama dan memiliki nilai kualitasnya yang sama juga (nilai kualitas  $\geq 85$ ). Untuk menentukan senyawa mana yang akan diambil, maka perlu melihat nilai referensinya. Senyawa yang memiliki nilai referensi yang besar, maka dapat diambil. Seperti pada variabel suhu 300°C, waktu 30 menit, dan jumlah katalis 75 gram seperti gambar A.5 berikut ini :

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	2.156	0.79	C:\Database\NIST02.L			
			Ethylbenzene	4963	000100-41-4	91
			Ethylbenzene	4961	000100-41-4	91
			Ethylbenzene	4962	000100-41-4	91

**Gambar A.5.** Hasil Analisis Produk Cair menggunakan GC-MS untuk Variabel Suhu 300°C, Waktu 30 menit, dan Jumlah Katalis 75 gram

Pada kolom keterangan (%) tabel A.7 hingga A.14, kadar untuk masing-masing senyawa merupakan hasil penjumlahan kadar dari kolom kadar hidrokarbon (%). Misal, pada variabel suhu 300°C, waktu 15 menit, dan jumlah katalis 75 gram, dari *software* GC-MS hanya terbaca senyawa 2(3H)-Furanone dan Benzoic Acid yang masing-masing memiliki kadar hidrokarbon 3,93 % dan 9,77 %. Kedua senyawa tersebut merupakan turunan dari n-paraffin. Sehingga untuk kadar n-paraffin pada variabel suhu 300°C, waktu 15 menit, dan jumlah katalis 75 gram adalah 13,7 %. Berikut rekapan dari hasil analisis produk cair menggunakan GC-MS :



**Tabel A.7.** Kandungan Produk Cair pada Variabel T = 300°C, t = 15 menit, dan Jumlah Katalis = 75 gram

Nama Senyawa	Kadar Hidrokarbon (%)	Keterangan (%)
2(3H)-Furanone	3.93	n-Paraffin 13.7
Benzoic Acid	9.77	
Sub Total (%)	13.7	
Unknown (%)	86.3	
Total (%)	100	

**Tabel A.8.** Kandungan Produk Cair pada Variabel T = 300°C, t = 30 menit, dan Jumlah Katalis = 75 gram

<b>Nama Senyawa</b>	<b>Kadar Hidrokarbon (%)</b>	<b>Keterangan (%)</b>
Cyclopentene, 1-butyl	0.26	Cycloparaffin 2.51
Cyclododecene	1.05	
Cyclododecane	0.64	
Naphthalene, 2-methyl	0.56	
Nonane	2.5	n-Paraffin 38.3
Decane	3.59	
7-Decanol	0.84	
Undecane	4.93	
Dodecane	5.01	

Tridecane	4.29	
Tetradecane	4.15	
Pentadecane	4.52	
Hexadecane	4.34	
Heptadecane	4.13	
1-nonene	2.22	Olefin 43.27
cis-3-nonene	0.26	
1-Decene	4.71	
2-Decene, (E)-	1.38	
2-Decene, (Z)-	0.6	
1-Undecene	4.68	
5-Undecene	1.35	
5-Undecene	0.69	
1-Dodecene	4.31	
5-Dodecene	1.85	
1H-Indene,2,3-dihydro-4,7-dimethyl	0.26	
2-Dodecen, (Z)-	0.61	
cis-9-Tetradecene-1-ol	1	
1-Tridecene	3.69	
2-Tridecene, (E)-	0.78	
2-Tridecene, (E)-	0.66	
1,13-Tetradecadiene	0.72	
2-Tetradecene, (E)-	3.7	
3-Tetradecene, (Z)-	0.54	
3-Tetradecene, (Z)-	0.46	

1-Pentadecene	3.35	
E-2-Hexadecacene-1-ol	0.52	
7-Hexadecene, (Z)-	2.63	
3-Heptadecene, (Z)-	2.3	
Ethylbenzene	0.79	Aromatik 7.5
p-Xylene	1.76	
Benzene, propyl	1.06	
Benzene, 1-ethyl-2-methyl	0.79	
Benzen, butyl-	0.96	
Benzene, 1,2-diethyl	0.35	
Benzene, 1-methyl-2-propyl	0.74	
Benzene, 1-methyl-2-methylpropyl	0.65	
n-heptylbenzene	0.4	
<b>Sub Total (%)</b>	<b>91.58</b>	
Unknown (%)	8.42	
<b>Total (%)</b>	<b>100</b>	

**Tabel A.9.** Kandungan Produk Cair pada Variabel T = 300°C, t = 45 menit, dan Jumlah Katalis = 75 gram

Nama Senyawa	Kadar Hidrokarbon (%)	Keterangan (%)
Cyclopropane	3.39	Cycloparaffin 5.83
Methylnaphthalene	1.15	
Naphthalene	0.42	

Naphthalene	0.87	
Nonane	2.14	n-Paraffin 35.55
Decane	2.76	
Undecane	3.81	
Dodecane	3.83	
Octadecane	2.06	
Tridecane	4.14	
Tetradecane	4.7	
Pentadecane	5.61	
Hexadecane	6.5	
1-Nonene	1.61	Olefin 33.22
1-Decene	3.53	
2-Decene, (Z)	1.09	
2-Decene, (E)-	0.27	
5-Undecene	1.01	
5-Undecene	0.4	
1-Dodecene	3.49	
2-Dodecene, (E)-	0.45	
1-Tetradecene	0.62	
1-Tridecene	5.09	
2-Tridecene, (Z)-	0.86	
cis-9-Tetradecen-1-ol	0.8	
2-Tetradecene, (E)-	4.08	
3-Tetradecene, (Z)-	0.75	
2-Tetradecene, (E)-	0.54	
1-Pentadecene	3.95	

5-Octadecene, (E)-	0.59	
1-Hexadecane	3.58	
7-Hezadecene, (Z)	0.51	
1-Tetradecyne	0.45	Alkuna 1.01
1-Pentadecyne	0.56	
Ethylbenzene	0.73	Aromatik 4.12
Benzene, 1,3-dimethyl	0.63	
p-Xylene	1.29	
Benzene, propyl-	0.73	
Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	0.74	
<b>Sub Total (%)</b>	<b>79,73</b>	
Unknown (%)	20,27	
<b>Total (%)</b>	<b>100</b>	

**Tabel A.10.** Kandungan Produk Cair pada Variabel T = 250°C, t = 45 menit, dan Jumlah Katalis = 75 gram

<b>Nama Senyawa</b>	<b>Kadar Hidrokarbon (%)</b>	<b>Keterangan (%)</b>
Cyclopentane, pentyl-	0.28	Cycloparaffin 3.29
Cyclopentane, decyl-	0.38	
Cyclodecene, (Z)-	0.43	
methylnapthalene	1.19	
Napthalene, 1-methyl	1.01	
Nonane	2.15	n-Paraffin
Decane	2.82	
Undecane	3.77	

Dodecane	3.71	47
Octadecane	1.43	
Tetrdecane	4.51	
Pentadecane	5.02	
Hexadecene	5.68	
Heptadecane	5.6	
Tridecane	4.74	
Nonadecane	7.57	
1-Nonanene	1.66	Olefin 37.87
1-Decene	3.55	
2-Decene, (E)	1.1	
2-Decene, (Z)	0.32	
1-Undecene	3.33	
5-Undecene	1.03	
5-Undecene	0.41	
1-Pentadecyne	0.39	
1-Dodecene	2.99	
2-Tetradecene, (E)-	0.39	
3-Hexadecene, (Z)-	0.47	
1-Tetradecene	1.28	
1-Tridecene	3.82	
2-Tridecene, (Z)-	1.83	
2-Tetradecene, (E)-	3.27	
3-Tetradecene, (Z)-	0.75	
2-Tetradecene, (E)-	0.51	
1-pentadecane	2.92	

5-Octadecene, (E)-	0.54	
1-Hexadecene	2.58	
3-Hexadecene, (Z)-	0.49	
1-Nonadecene	4.24	
Ethylbenzene	0.64	Aromatik 4.29
o-Xylene	0.61	
p-Xylene	1.35	
Benzene, propyl-	0.71	
Benzene, 1-ethyl-2-methyl-	0.66	
Benzene, 1-methyl-4-(2-methylpropyl)-	0.32	
<b>Sub Total (%)</b>	<b>92.45</b>	
Unknown (%)	7.55	
<b>Total (%)</b>	<b>100</b>	

**Tabel A.11.** Kandungan Produk Cair pada Variabel T = 350°C, t = 45 menit, dan Jumlah Katalis = 75 gram

Nama Senyawa	Kadar Hidrokarbon (%)	Keterangan (%)
Naphthalene, 1-methyl-	2.12	Cycloparaffin 4.39
Naphthalene, 1-methyl-	1.65	
Naphthalene, 1-ethyl-	0.62	
Nonane	2.36	n-Paraffin
Decane	2.5	
4-Decane	1.18	
4-Decane	0.26	

Undecane	3.32	48.32
5-Undecene	1.14	
5-Undecene	0.39	
Dodecane	3.77	
Tridecane	4.6	
2-Tetradecane, ( E )-	1.71	
Octadecane	1.33	
Tetradecane	4.49	
Pentadecane	5.02	
Hexadecane	5.42	
Heptadecane	6.05	
Nonadecane	4.78	
1-Nonene	1.34	Olefin 26.23
1-Tridecene	3.23	
1-Dodecene	3.25	
3-Dodecene, ( E )-	0.6	
3-Hexadecene, ( Z )-	0.9	
1-Tridecene	3.99	
2-Tetradecene, ( E )-	3.01	
2-Tetradecene, ( E )-	0.77	
5-Octadecene, ( E )-	0.51	
1-Pentadecene	2.41	
E-14-Hexadecenal	0.43	
Z-8-Hexadecene	1.94	
Z-5-Nonadecene	3.85	
1-Hexadecyne	0.68	Alkuna 2.19
1-Hexadecyne	1.51	



Benzene, 1,3-dimethyl-	0.45	Aromatik 3.2
p-Xylene	0.85	
Benzene, propyl-	0.68	
Benzene, 1-ethyl-3-methyl	0.78	
OCTYLBENZENE	0.44	
<b>Sub Total (%)</b>	<b>84.33</b>	
Unknown (%)	15.67	
<b>Total (%)</b>	<b>100</b>	

**Tabel A.12.** Kandungan Produk Cair pada Variabel T = 400°C, t = 45 menit, dan Jumlah Katalis = 75 gram

<b>Nama Senyawa</b>	<b>Kadar Hidrokarbon (%)</b>	<b>Keterangan (%)</b>
Naphthalene, 1-methyl-	1.08	Cycloparaffin 1.08
Nonane	2.23	n-Paraffin 52.57
Decane	2.78	
Undecane	3.61	
Dodecane	3.84	
9-Eicosene, ( E )-	3.82	
Tridecane	4.74	
Octadecane	0.85	
Octadecane	1.55	
Tetradecane	4.53	
Pentadecane	5.69	
Hexadecane	6.13	

Heptadecane	7	
Nonadecane	5.8	
1-Nonene	1.36	Olefin 32.18
1-Decene	3.16	
2-Decene, (Z)-	0.89	
2-Decene, (Z)-	0.26	
5-Undecene	3.15	
5-Undecene	0.81	
5-Undecene	0.34	
1-Dodecene	3.08	
3-Hexadecene, (Z)-	0.38	
3-Hexadecene, (Z)-	0.79	
2-Tetradecene, ( E )-	1.74	
2-Tetradecene, ( E )-	3.42	
2-Tetradecene, ( E )-	0.6	
2-Tetradecene, ( E )-	0.47	
1-Pentadecene	3.48	
E-14-Hexadecenal	0.81	
1-Hexadecene	2.96	
3-Hexadecene, (Z)-	0.52	
Z-5-Nonadecene	3.96	
Ethylbenzene	0.9	Aromatik 4.53
p-Xylene	0.61	
p-Xylene	1.24	
Benzene, propyl-	0.67	
Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	0.72	

Benzene, 1-methyl-2-propyl	0.39	
<b>Sub Total (%)</b>	<b>90.36</b>	
Unknown (%)	9.64	
<b>Total (%)</b>	<b>100</b>	

**Tabel A.13.** Kandungan Produk Cair pada Variabel T = 400°C, t = 45 menit, dan Jumlah Katalis = 50 gram

<b>Nama Senyawa</b>	<b>Kadar Hidrokarbon (%)</b>	<b>Keterangan (%)</b>
Cyclohexadecane	1.05	Cycloparaffin 1.62
Naphthalene, 2-methyl-	0.57	
Nonane	1.65	n-Paraffin 43.62
Decane	2.14	
1-Undecene	3.12	
Undecane	3	
Dodecane	2.93	
Tridecane	3.99	
Octadecane	1.52	
Octadecane	1.23	
Octadecane	2.39	
Octadecane	1.71	
Octadecane	2.06	
Hexadecane	3.28	
Heneicosane	4.18	
Hexadecane	4.17	

Heptadecane	5.77	
Eicosane	0.48	
1-Nonene	1.57	Olefin 42.74
1-Decene	3.15	
4-Decene	0.78	
5-Undecene	0.73	
5-Undecene	0.26	
1-Dodecene	3.34	
2-Dodecene, ( E )-	0.33	
5-Octadecene, ( E )-	1.14	
5-Octadecene, ( E )-	0.98	
1-Octadecene	0.33	
1-Tridecene	3.92	
2-Tetradecene, ( E )-	3.8	
2-Tetradecene, ( E )-	0.32	
1-Octadecene	0.15	
1-Pentadecene	4.19	
1-Nonadecene	0.56	
1-Hexadecene	3.96	
7-Hexadecene, ( Z )-	0.3	
Z-5-Nonadecene	5.15	
Nonadecane	7.78	
5-Hexadecyne	0.62	Alkuna 1.88
1-Octadecyne	1.26	
Ethylbenzene	0.4	Aromatik

Benzene, 1,3-dimethyl-	0.51	5.23
Benzene, 1,3-dimethyl-	0.87	
Benzene, propyl-	0.34	
Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	0.41	
Indene	0.29	
1,11-Dodecadiene	0.73	
1,13-Tetradecadiene	0.76	
1,13-Tetradecadiene	0.92	
<b>Sub Total (%)</b>	<b>95.09</b>	
Unknown (%)	4.91	
<b>Total (%)</b>	<b>100</b>	

**Tabel A.14.** Kandungan Produk Cair pada Variabel T = 400°C, t = 45 menit, dan Jumlah Katalis = 125 gram

<b>Nama Senyawa</b>	<b>Kadar Hidrokarbon (%)</b>	<b>Keterangan (%)</b>
Bicyclo[6.4.0]dodeca-9,11-diene	0.84	Cycloparaffin 6.93
Cyclotetradecane	0.74	
Naphthalene, 1-methyl-	2.6	
Naphthalene, 2-methyl-	1.53	
Naphthalene, 1-ethyl-	0.72	
Naphthalene, 1,3-dimethyl-	0.5	
Nonane	2.08	n-Paraffin
Decane	2.55	
Undecane	3.45	

Dodecane	3.56	47.16
Tridecane	4.1	
Octadecane	0.84	
Tetradecane	4.1	
Pentadecane	5.03	
Hexadecane	4.66	
Heptadecane	6.22	
Nonadecane	4.4	
Eicosane	6.17	
1-Nonene	0.94	Olefin 25.6
4-Decene	1.01	
4-Decene	0.19	
5-Undecene	2.67	
5-Undecene	0.88	
5-Undecene	0.32	
1-Dodecene	2.51	
9-Octadecene, ( E )-	1.23	
1-Octadecene	0.84	
6-Tridecene, (Z)-	3.05	
2-Tridecene, (Z)-	1.25	
2-Tetradecene, ( E )-	2.56	
3-Tetradecene, (Z)-	0.58	
1-Pentadecene	2.39	
1-Nonadecene	0.72	
Z-8-Hexadecene	1.77	
Z-5-Nonadecene	2.69	

Ethylbenzene	1.14	Aromatik 10.43
p-Xylene	0.58	
p-Xylene	1.48	
Benzene, propyl-	0.76	
Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	0.96	
Benzene, 1-ethyl-2-methyl-	2.85	
Indene	0.61	
Benzene, butyl-	0.69	
Benzene, 1,2-diethyl-	0.29	
Benzene, 1-methyl-2-propyl-	0.61	
OCTYLBENZENE	0.46	
<b>Sub Total (%)</b>	<b>90.12</b>	
Unknown (%)	9.88	
<b>Total (%)</b>	<b>100</b>	

#### A.6. Perbandingan Kandungan Hidrokarbon pada Semua Variabel

**Tabel A.15.** Kandungan Gugus Hidrokarbon dari Produk Cair untuk Suhu 300°C, Jumlah Katalis 75 gram, dan Berbagai Variabel Waktu

Gugus Hidrokarbon	Kadar Berdasarkan Variabel Waktu (%)		
	15 menit	30 menit	45 menit
Cycloparaffin	0	2.51	5.83
n-Paraffin	13.7	38.3	35.55
Olefin	0	43.27	33.22
Alkuna	0	0	1.01
Aromatik	0	7.5	4.12
Unknown	86,3	8,42	20,27

**Tabel A.16.** Kandungan Gugus Hidrokarbon dari Produk Cair untuk Waktu 45 menit, Jumlah Katalis 75 gram, dan Berbagai Variabel Suhu

Gugus Hidrokarbon	Kadar Berdasarkan Variabel Suhu (%)			
	250°C	300°C	350°C	400°C
Cycloparaffin	3.29	5.83	4.39	1.08
n-Paraffin	47	35.55	48.32	52.57
Olefin	37.87	33.22	26.23	32.18
Alkuna	0	1.01	2.19	0
Aromatik	4.29	4.12	3.2	4.53
Unknown	7,55	20,27	15,67	9,64

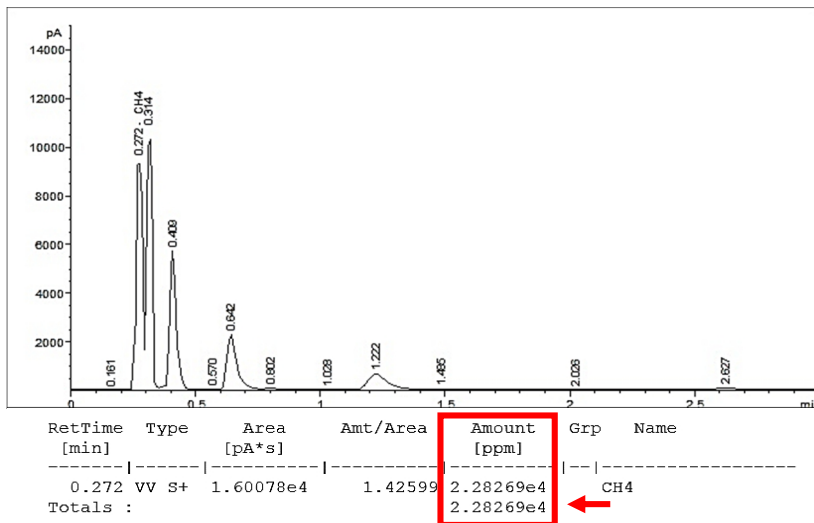
**Tabel A.17.** Kandungan Gugus Hidrokarbon dari Produk Cair untuk Suhu 400°C, Waktu 45 menit, dan Berbagai Variabel Jumlah Katalis

Gugus Hidrokarbon	Kadar Berdasarkan Variabel Katalis (%)		
	0,4	0,6	1
Cycloparaffin	1.62	1.08	6.93
n-Paraffin	43.62	52.57	47.16
Olefin	42.74	32.18	25.6
Alkuna	1.88	0	0
Aromatik	5.23	4.53	10.43
Unknown	4,91	9,64	9,88

#### A.7. Hasil Analisis Kandungan Metana dari Produk Gas Menggunakan GC (*Gas Chromatography*)

Hasil analisis yang telah dilakukan di Laboratorium Bioproses, Jurusan Teknik Kimia, Universitas Surabaya, misal, untuk variabel suhu 300°C dan waktu 15 menit menunjukkan grafik untuk kandungan metana pada variabel tersebut adalah sebagai berikut :





**Gambar A.6.** Hasil Analisis Kandungan Metana pada Produk Gas Menggunakan GC untuk Variabel Suhu 300°C dan Waktu 15 Menit

Dari hasil Analisis GC seperti pada gambar A.6, diperoleh :

*Retention time* = 0.272 menit

Luas area =  $1.60078 \times 10^4$

Jumlah =  $2.28269 \times 10^4$  ppm

Untuk menghitung konsentrasi gas, digunakan persamaan :

$$\text{Konsentrasi} = \frac{\text{Jumlah}}{10^6} \frac{\text{gram metana}}{\text{gram gas}}$$

$$\text{Konsentrasi} = \frac{2.28269 \times 10^4}{10^6} \frac{\text{gram metana}}{\text{gram gas}}$$

$$\text{Konsentrasi} = 0.023 \frac{\text{gram metana}}{\text{gram gas}}$$

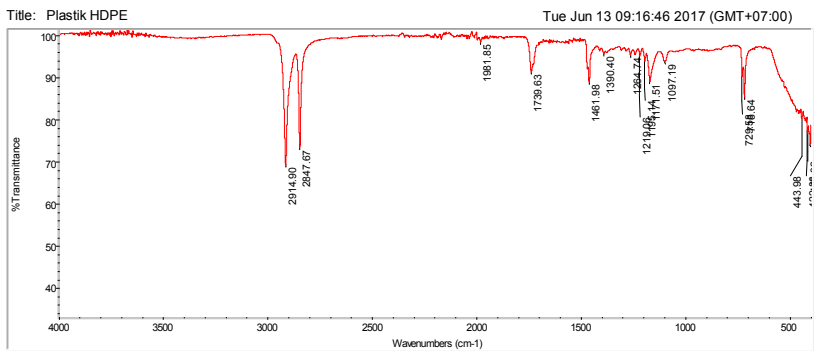
Kemudian, dilakukan perekapan data, sehingga diperoleh konsentrasi gas untuk masing-masing variabel sebagai berikut :

**Tabel A.18.** Konsentrasi Gas dari Produk Gas untuk Suhu 300°C, Waktu 15 menit

No.	Variabel		Massa Katalis Karbon Aktif (gr)	Jumlah (ppm)	Konsentrasi (gram metana/ gram gas)	Konsentrasi (%)
	Suhu (°C)	Waktu (Menit)				
1	300	15	75	22826.9	0.023	2.3
2	300	30	75	33363.2	0.033	3.3
3	300	45	75	70590.2	0.071	7.1
4	250	45	75	51737.4	0.052	5.2
5	350	45	75	72642	0.073	7.3
6	400	45	75	74105.7	0.074	7.4
7	400	45	50	72804.5	0.073	7.3
8	400	45	125	102161	0.102	10.2

**A.8. Hasil Analisis Kandungan Bahan Baku (Plastik HDPE) Menggunakan FTIR (*Fourier Transform Infra Red*)**

Hasil analisis yang telah dilakukan di Laboratorium Divisi Karakterisasi Material, Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, diperoleh hasil uji pada gambar A.7 sebagai berikut :



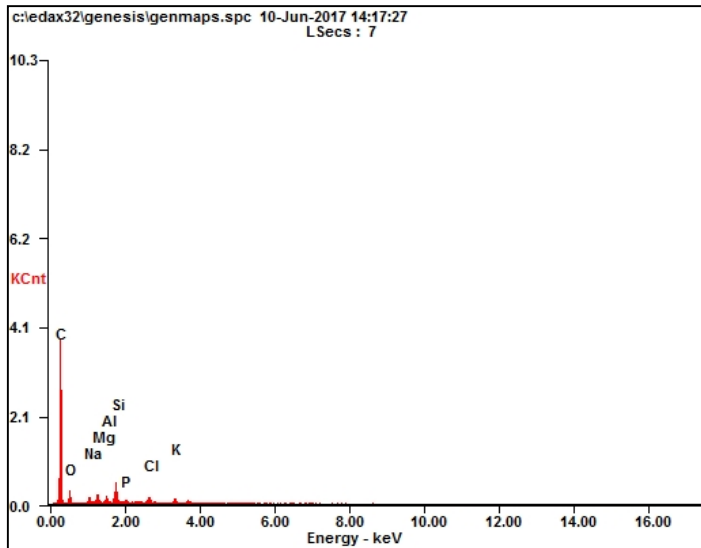
**Gambar A.7.** Hasil Analisis Kandungan Bahan Baku (Plastik HDPE)

Plastik HDPE		
3495.26-455.13		
Correlation		
Match	Compound name	Library
86.95	Polyethylene, low density	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
86.95	polyethylene	HR Nicolet Sampler Library
83.76	POLY(ETHYLENE), LOW DENSITY	Aldrich Condensed Phase Sample Library
83.58	Ethyl triacontanoate, 98%	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
82.58	Octadecanoic acid; Stearic acid	HR Hummel Polymer and Additives
81.85	Tritriacontane, 98%	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
81.09	Polyethylene, oxidized, low molecular weight	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
80.22	Beeswax, refined, Yellow	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
80.21	1-Triacontanol, 96%	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
79.89	Hexatriacontane, 98%	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II

**Gambar A.8.** Hasil Analisis Kandungan Bahan Baku (Plastik HDPE)

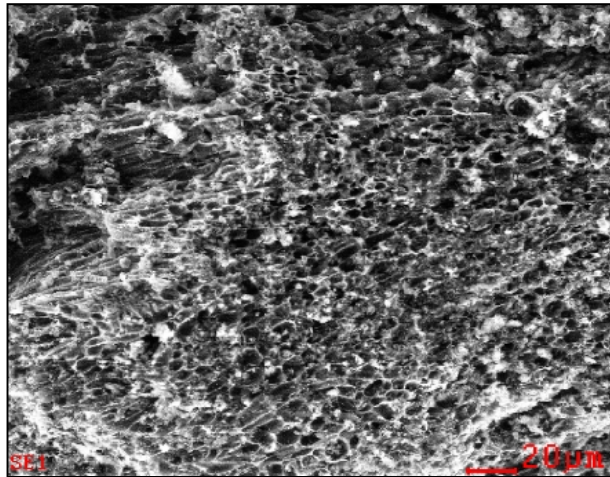
**A.9. Hasil Analisis Kandungan dan Morfologi Katalis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa dengan Menggunakan SEM-EDX (*Scanning Electron Microscope- Energy Dispersive X-ray spectroscopy*)**

Hasil analisis yang telah dilakukan di Laboratorium Divisi Karakterisasi Material, Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, diperoleh hasil uji sebagai berikut :



**Gambar A.9.** Hasil Analisis Morfologi Katalis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa dengan Menggunakan SEM-EDX pada perbesaran 20 $\mu$ m.

Hasil kandungan dari karbon aktif dari tempurung kelapa dapat dilihat pada gambar A.10 dan tabel A.19 sebagai berikut :



**Gambar A.10.** Hasil Analisis Kandungan Katalis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa dengan Menggunakan SEM-EDX pada perbesaran 20μm.

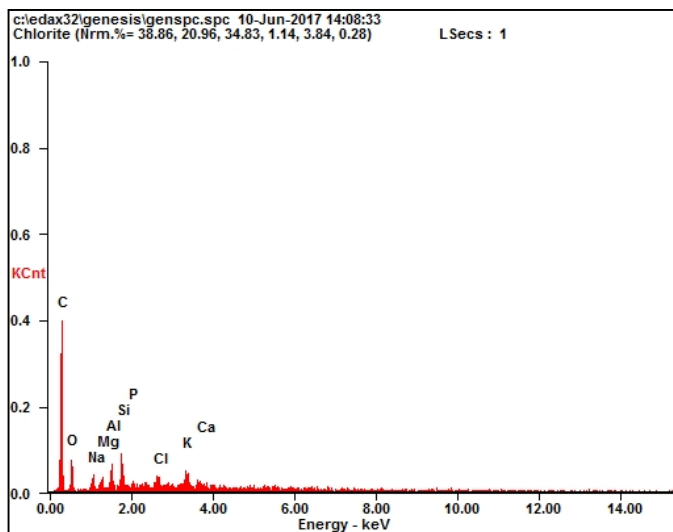
**Tabel A.19.** Kandungan Katalis Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa dengan Menggunakan SEM-EDX pada perbesaran 20μm

Komponen	Wt (%)	At (%)
<b>C</b>	68,49	78,81
<b>O</b>	15,68	13,55
<b>Na</b>	01,49	00,90
<b>Mg</b>	02,58	01,47
<b>Al</b>	01,49	00,76
<b>Si</b>	05,08	02,50
<b>P</b>	01,14	00,51
<b>Cl</b>	02,07	00,81
<b>K</b>	01,97	00,70

Keterangan :    Wt (%) = %Berat  
                          At (%) = %Area

#### A.10. Hasil Analisis Kandungan Produk Padat dengan Menggunakan EDX (*Energy Dispersive X-ray spectroscopy*)

Hasil analisis yang telah dilakukan di Laboratorium Divisi Karakterisasi Material, Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, diperoleh hasil uji seperti gambar A.11 sebagai berikut :



**Gambar A.11.** Hasil Analisis Kandungan Produk Padat (Residu) Menggunakan EDX

**Tabel A.20.** Kandungan Produk Padat (Residu) Menggunakan EDX

Komponen	Wt (%)	At (%)
<b>C</b>	69,98	78,51
<b>O</b>	19,88	16,74
<b>Na</b>	01,87	01,10
<b>Al</b>	01,94	00,97
<b>Si</b>	03,39	01,62

Cl	01,42	00,54
K	01,52	00,53

Keterangan :    Wt (%) = %Berat  
                          At (%) = %Area

### A.11. Hasil Analisis *Surface Area* Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa Menggunakan BET (*Brunauer, Emmet, dan Teller*)

Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction  
 for NOVA instruments  
 ©1994-2007, Quantachrome Instruments  
 version 10.01

Analysis	Date: 2017/06/20	Report	Date: 6/20/2017
Operator: ITS	Filename:	Operator: ITS	
Sample ID: Bulloh	Comment:	C:\Qcdata\Physisorb\17062001 CSAC.qps	
Sample Desc: Serbuk	Sample Volume:	20 Juni 2017	
Sample weight: 0.0218 g	Outgas Temp:	300.0 C	
Outgas Time: 3.0 hrs	Bath Temp:	77.3 K	
Analysis gas: Nitrogen	Equil time:	60/60 sec (ads/des)	Equil timeout: 120/120 sec (ads/des)
Press. Tolerance: 0.050/2.000 (ads/des)	End of run:	2017/06/20 5:22:02	Instrument: Nova Station A
Analysis Time: 94.3 min			
Cell ID: 26	Temperature	77.350K	
Adsorbate Nitrogen	Cross Section:	16.200 Å²	Liquid Density: 0.808 g/cc
Molec. Wt.: 28.013 g			

Relative Pressure	Volume @ STP	1 / [ w((P <sub>o</sub> /P) - 1) ]
P/P <sub>o</sub>	cc/g	
9.54540e-02	129.0979	6.5403e-01
1.50204e-01	129.0746	1.0957e+00
2.02672e-01	126.6443	1.6059e+00
2.53985e-01	124.6193	2.1859e+00
3.06230e-01	118.7087	2.9751e+00

BET summary

slope =	10.900
Intercept =	-4.953e-01
correlation coefficient, r =	0.992342
C constant =	-21.007
Surface Area =	334.711 m²/g

**Gambar A.12.** Hasil Analisis *Surface Area* Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa Menggunakan BET

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## BIODATA PENULIS



**MUHAMMAD ABDILLAH**, lahir di Surabaya, 04 Januari 1995 merupakan anak ketiga dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Mabadiul Ulum Surabaya, SMP Negeri 30 Surabaya, dan SMA IPIEMS Surabaya. Pada tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan S1 di Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pada tahun 2016, penulis melakukan kerja praktik di PT. Petrokimia Gresik. Kemudian, pada tahun 2017, penulis melakukan penelitian di Laboratorium Pengolahan Limbah Industri Departemen Teknik Kimia FTI-ITS dengan bimbingan ibu Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M.Eng dan bisa menyelesaikan skripsi dengan judul “*PENGOLAHAN LIMBAH PLASTIK HIGH DENSITY POLYETHYLENE DENGAN METODE PIROLISIS MICROWAVE DAN MENGGUNAKAN KATALIS KARBON AKTIF DARI TEMPURUNG KELAPA UNTUK MENGHASILKAN BAHAN BAKAR ALTERNATIF*”

*Contact person :*

*e-mail* : adie.abdillah@gmail.com

*Hp* : +6281249483335

## BIODATA PENULIS



**MOHAMAD IQBAL HISBULLAH**, lahir di Yogyakarta, 02 Juni 1995 merupakan anak kedua dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Unggulan Al-Amin Kabupaten Bandung Barat, SMP Islam Terpadu Baitul Anshor Kota Cimahi, dan SMA Negeri 8 Bandung. Pada tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan S1 di Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pada tahun 2016, penulis melakukan kerja praktik di PT. Chandra Asri Petrochemical, Tbk. Kemudian, pada tahun 2017, penulis melakukan penelitian di Laboratorium Pengolahan Limbah Industri Departemen Teknik Kimia FTI-ITS dengan bimbingan ibu Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M.Eng dan bisa menyelesaikan skripsi dengan judul **“PENGOLAHAN LIMBAH PLASTIK *HIGH DENSITY POLYETHYLENE* DENGAN METODE PIROLISIS *MICROWAVE* DAN MENGGUNAKAN KATALIS KARBON AKTIF DARI TEMPURUNG KELAPA UNTUK MENGHASILKAN BAHAN BAKAR ALTERNATIF”**

*Contact person :*

*e-mail* : hasballah35@gmail.com

*Hp* : +6287823765664